Cosmología Cuántica: Una Perspectiva Epistemológica y Ontológica en Cosmología Cuántica y Niveles del Multiverso

Capítulo 1 : Introducción

En la presente tesis se afirma que la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica es incapaz de derivar probabilidades objetivas y la regla de Born sin caer en argumentos circulares, y por otro lado, que los modelos cosmológicos actuales, como los inflacionarios o cíclicos, son una visión epistemológica e incompleta de la realidad, presentando cada uno sus propios problemas, sin poder incorporar la gravedad cuántica y donde falla la hipótesis del universo de bloques, provocando la aparición de infinitos. Sin embargo, con un modelo de cosmología cuántica, y con una función de onda universal con una curva de tiempo cerrada (CTC), y que aplica la interpretación de Everett, todos estos problemas desaparecen, ofreciendo una visión completa, objetiva y ontológica del universo, que da lugar a un modelo de universo de bloques, espacialmente finito, sin bordes, y aparentemente estático, que proporciona una visión ontológica al significado de la flecha del tiempo y las probabilidades en el marco de la mecánica cuántica.

Además, se combina con las teorías actuales que intentan resolver el problema de la gravedad cuántica, priorizando un tipo de espacio-tiempo discreto. Este modelo de "multiverso cuántico" consigue conectar con modelos cosmológicos relativistas a través de la hipótesis MWI=Cosmological Multiverse, aplicando un método holográfico y el principio de complementariedad, emergiendo tanto el espacio-tiempo como la regla de Born de forma natural.

Demuestro en adición que sin una teoría de las variables ocultas y el superdeterminismo, este modelo es la única forma de reconstruir el determinismo debido al problema de la medición, y si no es cierto, la realidad es intrínsecamente indeterminada y no hay flecha del tiempo sin aparición de infinitos. Sólo una interpretación de variable oculta podría representar un modelo similar al que aquí se presenta, pero sería inevitablemente superdeterminista y conllevaría una serie de problemas que demuestran que la interpretación de Bohm es una interpretación de muchos mundos en negación.

Además, tanto en modelos de universos individuales como en modelos cíclicos o inflacionarios, se demuestra que la interpretación de Bohm no es capaz de reproducir la existencia de un único mundo posible, incluso cuando las condiciones iniciales durante el nacimiento de cada universo son las mismas, ya sea durante un gran rebote o el nacimiento de universos burbuja o "creación ex nihilo", Lo cual es un escenario altamente restrictivo e improbable.

Capítulo 2: Niveles del Multiverso Cuántico: Una Perspectiva Epistemológica y Ontológica

2.1 Re-evaluando el Multiverso: Más allá de la Clasificación de Tegmark

La noción de un multiverso, un conjunto hipotético de múltiples universos, ha ganado considerable atención en la física teórica y la cosmología. Aunque la idea de universos paralelos ha sido contemplada a lo largo de la historia, ha sido en las últimas décadas, impulsada por avances en la cosmología cuántica y la teoría de cuerdas, que el concepto ha adquirido un marco más científico. Max Tegmark propuso una influyente clasificación de los multiversos en cuatro niveles distintos, cada uno con una creciente diversidad de universos [1]. Sin embargo, la introducción a partir de la cual se desarrolla esta tesis doctoral sugiere una perspectiva novedosa, presentando una clasificación de los tres primeros niveles del multiverso como inherentemente epistemológicos, relacionados con nuestra forma de conocer y observar la realidad, mientras que el cuarto nivel se concibe como la forma ontológica del universo en sí mismo.

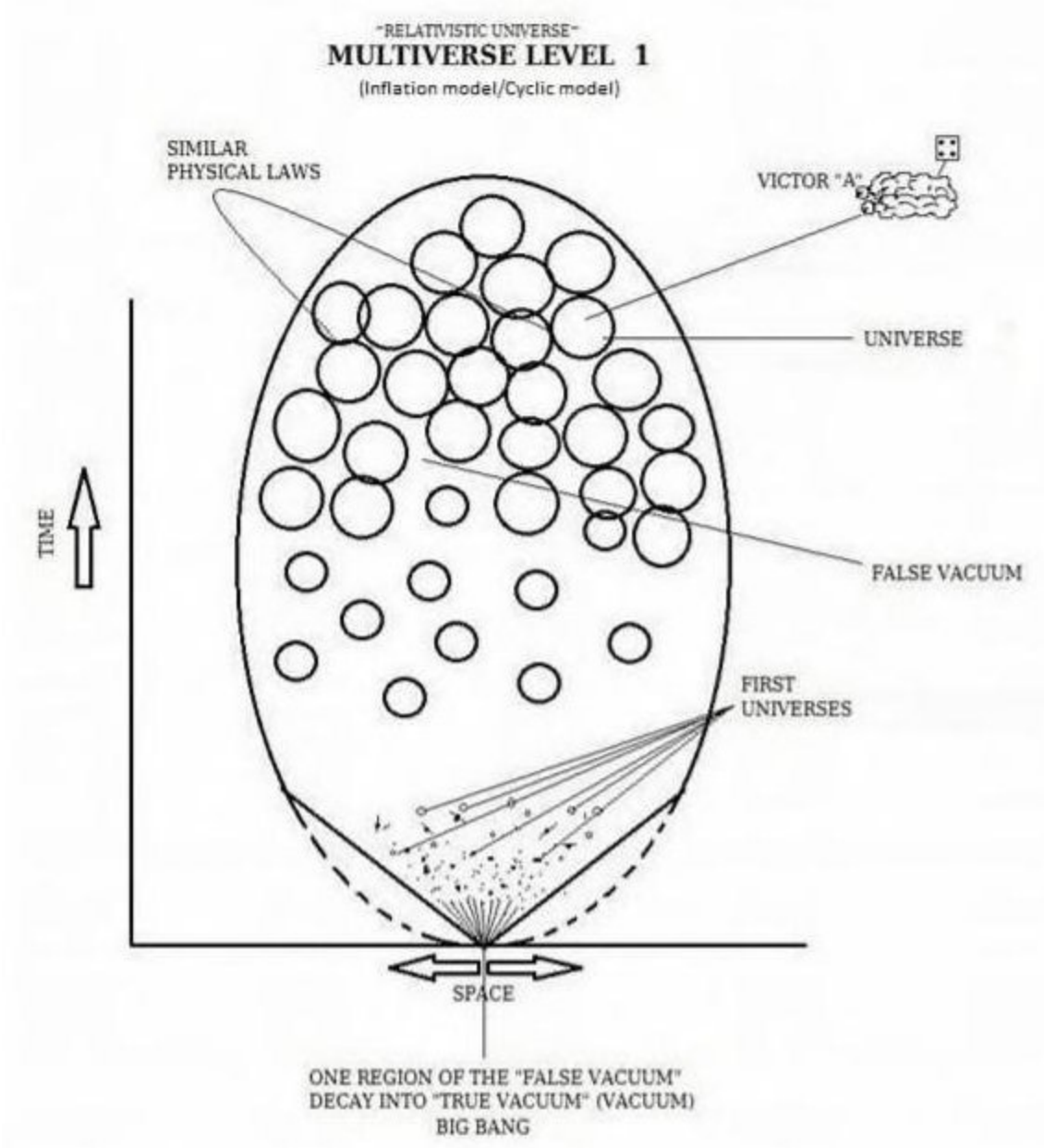
El documento "01-final quantum cosmology" [3], aunque no detalla explícitamente estos niveles del multiverso, proporciona un contexto crucial para entender el marco de la cosmología cuántica en el que esta clasificación se fundamenta. La cosmología cuántica se basa en la idea de que los principios de la mecánica cuántica deberían ser aplicables a todo en la naturaleza, incluyendo el universo en su totalidad [3]. Este enfoque intenta responder preguntas abiertas de la cosmología física clásica, como las concernientes a las fases iniciales del universo. Sin embargo, es importante señalar que aún no existe una versión única y completamente definida de una teoría que describa el universo como un sistema cuántico [3].

La distinción entre una visión epistemológica y una ontológica del multiverso es fundamental. La epistemología se ocupa de la naturaleza y el alcance del conocimiento, la justificación de las creencias y los límites de lo que podemos conocer. Aplicado al multiverso, un nivel epistemológico podría referirse a una perspectiva o un marco dentro del cual entendemos o accedemos a la posibilidad de otros universos, influenciado por nuestras limitaciones observacionales o interpretativas. Por otro lado, la ontología se refiere al estudio del ser o la existencia. Un nivel ontológico del multiverso implicaría la existencia real y fundamental de otros universos, independientemente de nuestra capacidad para observarlos o conocerlos directamente. La propuesta de que los tres primeros niveles son epistemológicos y el cuarto ontológico sugiere una jerarquía donde nuestra comprensión inicial del multiverso está ligada a nuestras perspectivas cognitivas y limitaciones, culminando en un nivel que representa la realidad última de múltiples universos.

2.2 Niveles Epistemológicos: Perspectivas sobre la Realidad

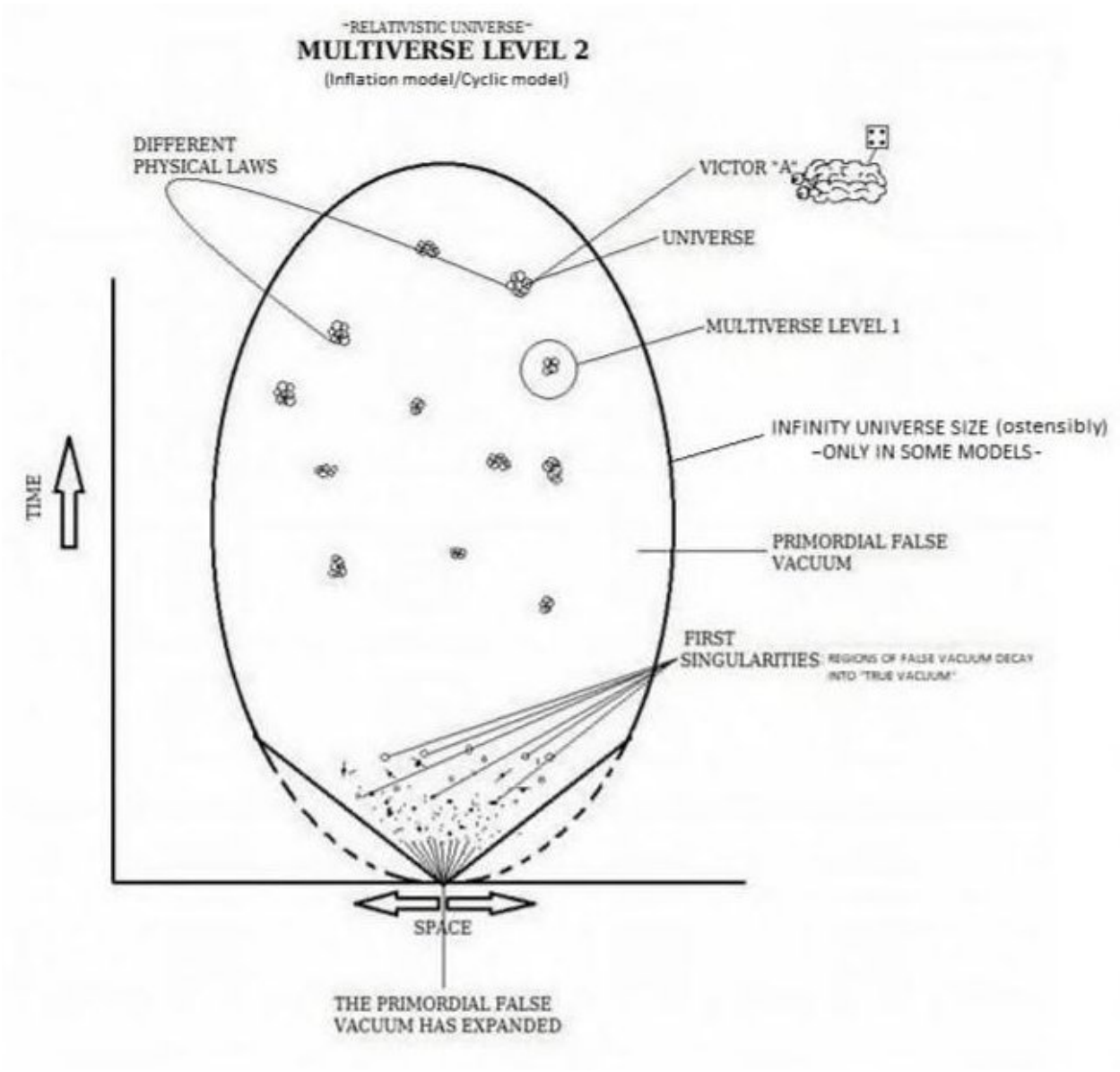
Los tres primeros niveles epistemológicos del multiverso representan diferentes formas en que podemos concebir o tener conocimiento de la existencia de otros universos, influenciados por nuestras limitaciones y marcos teóricos.

El primer nivel epistemológico podría estar relacionado con las regiones del espacio-tiempo que son actualmente inobservables debido a la expansión del universo y la velocidad finita de la luz. El concepto de volumen de Hubble, que representa todo lo que es actualmente visible desde la Tierra, ilustra esta limitación [1]. Si el espacio es infinito, como sugieren algunas observaciones del fondo cósmico de microondas [5], entonces debe haber un número infinito de volúmenes de Hubble, cada uno con potencialmente diferentes historias, aunque obedeciendo las mismas leyes efectivas de la física [1]. Este nivel se asemeja al Nivel I de Tegmark, el multiverso acolchado, donde las variaciones en las condiciones iniciales dentro de un universo infinito conducen a regiones que son copias de la nuestra, pero con diferentes distribuciones de materia [1]. La imposibilidad práctica de interactuar o incluso observar estas regiones más allá de nuestro horizonte cósmico define su naturaleza epistemológica: su existencia es una consecuencia lógica de nuestras teorías cosmológicas y observaciones, pero permanecen fuera de nuestro alcance empírico directo.



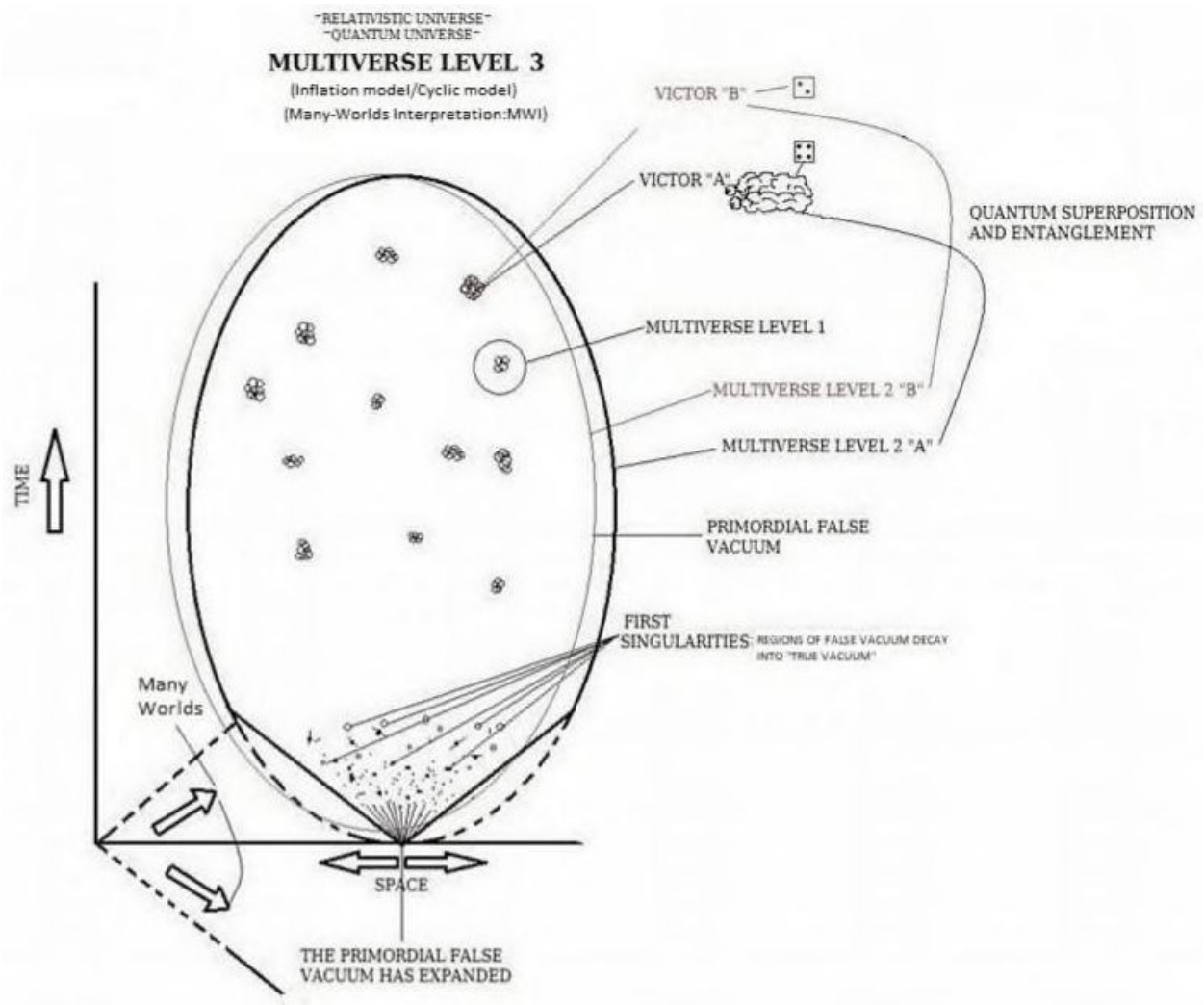
El segundo nivel epistemológico podría estar relacionado con la posibilidad de universos con diferentes constantes físicas o incluso diferentes leyes de la física, tal como se sugiere en el Nivel II de Tegmark, el multiverso inflacionario [1]. La teoría de la inflación eterna postula que durante la fase inflacionaria temprana del universo, algunas regiones del espacio dejaron de expandirse y formaron "universos burbuja", mientras que otras regiones continuaron inflándose [1]. Estos diferentes universos burbuja podrían haber sufrido diferentes rupturas de simetría, lo que lleva a diferentes conjuntos de partículas elementales, constantes físicas y dimensionalidad del espacio-tiempo [7]. Nuestra comprensión de estos universos se basa en modelos teóricos y extrapolaciones de nuestras propias leyes físicas. La imposibilidad de viajar o incluso

observar estos otros universos burbuja, debido a la continua inflación del espacio entre ellos, los sitúa en un nivel epistemológico: su existencia es una predicción de ciertas teorías cosmológicas, pero su naturaleza específica y sus leyes físicas son desconocidas y potencialmente incognoscibles para nosotros.



El tercer nivel epistemológico podría surgir de las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica, particularmente la interpretación de muchos mundos (MWI) [1]. Según la MWI, cada vez que ocurre un evento cuántico, el universo se divide en múltiples ramas, cada una representando uno de los posibles resultados [1]. Estas ramas o mundos paralelos coexisten, pero no interactúan entre sí debido al fenómeno de la decoherencia [8]. Desde una perspectiva epistemológica, la MWI nos ofrece una forma de entender la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica sin recurrir al

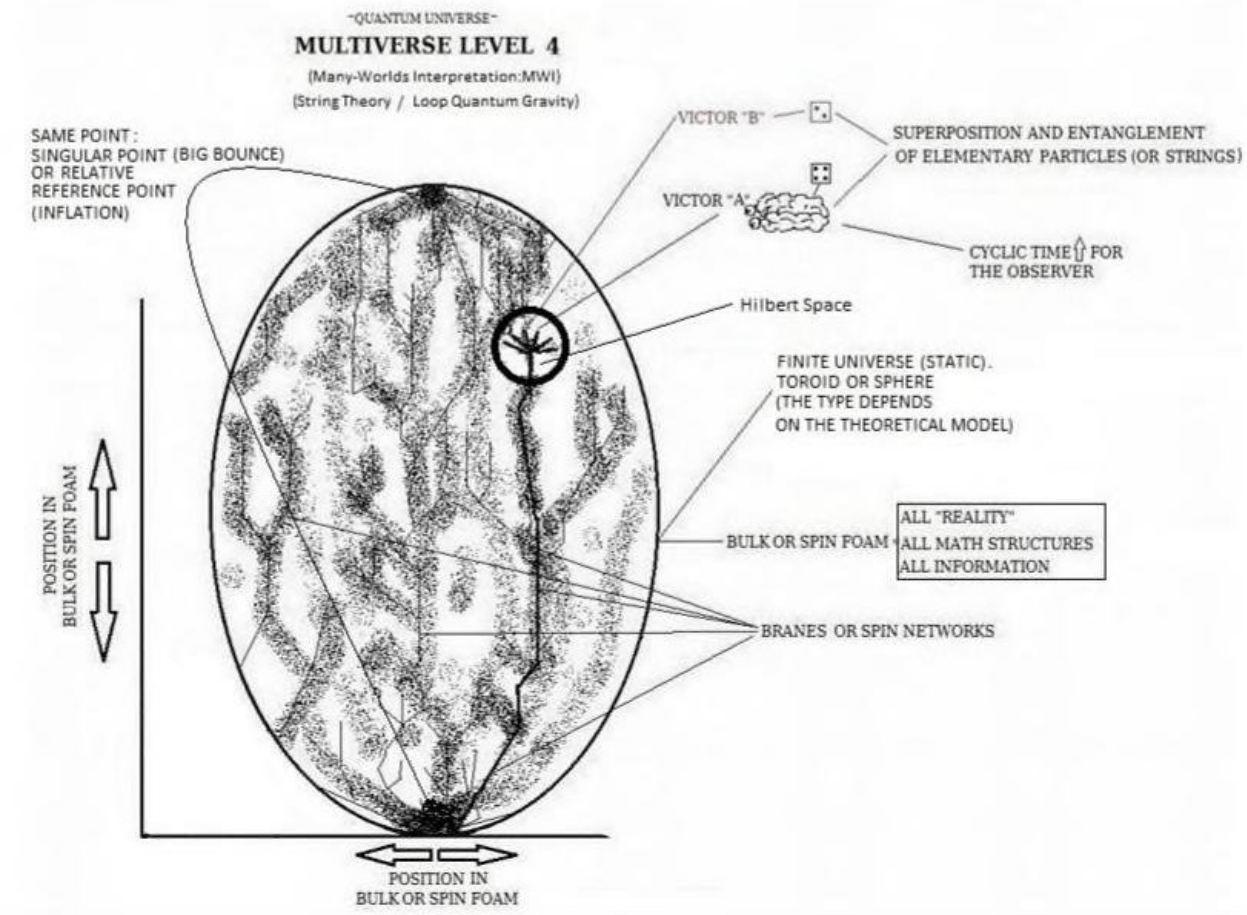
postulado del colapso de la función de onda [8]. La existencia de estos "muchos mundos" es una consecuencia de tomar la función de onda como una descripción físicamente real del universo que evoluciona de forma determinista según la ecuación de Schrödinger [8]. Nuestra percepción de un solo resultado se explica por el hecho de que estamos "enredados" con una rama particular del universo, sin tener acceso a las otras. Este nivel se corresponde con el Nivel III de Tegmark, el multiverso cuántico. Este nivel representa un problema de universos redundantes donde en el modelo de Tegmark y en la visión epistemológica del presente modelo, los universos paralelos de MWI son iguales que los universos de los Niveles I y II, pero independientes entre sí.



2.3 El Nivel Ontológico: La Naturaleza Fundamental de la Existencia

El cuarto nivel del multiverso es fundamentalmente cuántico representa la forma ontológica del universo. A diferencia de los niveles epistemológicos anteriores, que se

centran en nuestra forma de conocer o interpretar la realidad, este nivel se refiere a la existencia fundamental de todos los posibles universos surgiendo de una sola función de onda universal, independientemente de nuestra capacidad para observarlos o comprenderlos. La introducción menciona la posibilidad de un espacio-tiempo discreto, un concepto que ha surgido en varias teorías de gravedad cuántica como la gravedad cuántica de bucles [23] y la teoría de cuerdas [1], como un posible componente de este nivel ontológico.



La idea de un espacio-tiempo discreto sugiere que a escalas muy pequeñas, el espacio y el tiempo no son continuos, sino que están compuestos de unidades fundamentales indivisibles [27]. En la gravedad cuántica de bucles, por ejemplo, el espacio-tiempo se considera compuesto de una red finita de bucles entrelazados llamados redes de espín, cuya evolución en el tiempo da lugar a espumas de espín [28]. La teoría de cuerdas también implica una escala fundamental, la longitud de Planck, donde las nociones convencionales de espacio y tiempo podrían dejar de ser válidas [40]. Un modelo de cosmología cuántica con un espacio-tiempo discreto podría proporcionar una base ontológica para el multiverso, donde diferentes universos corresponden a diferentes configuraciones o estados de estas unidades fundamentales discretas.

Este nivel ontológico podría estar relacionado con el Nivel IV de Tegmark, el universo matemático, que postula que toda estructura matemática consistente existe también físicamente [1]. Si la realidad fundamental está descrita por estructuras matemáticas discretas que dan lugar al espacio-tiempo, entonces diferentes estructuras matemáticas podrían corresponder a diferentes universos con diferentes propiedades y leyes. La naturaleza ontológica de este nivel radica en la afirmación de que estas estructuras existen como una realidad fundamental, independientemente de si podemos derivarlas o comprenderlas completamente a través de nuestros marcos epistemológicos.

2.4 Contrastando Perspectivas: Comparación con el Multiverso de Tegmark

La clasificación del multiverso propuesta en la introducción difiere significativamente del esquema de cuatro niveles de Tegmark en su énfasis en la distinción entre lo epistemológico y lo ontológico, especialmente para los tres primeros niveles. Mientras que los niveles de Tegmark se basan principalmente en la distancia observacional y la diferencia en las leyes físicas, la clasificación propuesta se centra en nuestra forma de conocer o interpretar la posibilidad de otros universos, culminando en un nivel que representa su existencia fundamental.

El Nivel I de Tegmark, el multiverso acolchado, donde existen regiones distantes de espacio con las mismas leyes físicas pero diferentes historias, podría corresponder al primer nivel epistemológico de la clasificación propuesta. Ambos se refieren a la existencia de universos similares al nuestro, pero más allá de nuestro horizonte observable, cuya posibilidad surge de la asunción de un espacio infinito y distribuciones de materia aproximadamente uniformes [1]. Nuestra incapacidad para observar directamente estos universos los sitúa en el ámbito de lo epistemológico.

El Nivel II de Tegmark, el multiverso inflacionario, que postula universos con diferentes constantes físicas, podría considerarse como el segundo nivel epistemológico en la clasificación propuesta. Nuestra comprensión de estos universos se basa en modelos teóricos y extrapolaciones, y su inobservabilidad los mantiene en un nivel de conocimiento.

El Nivel III de Tegmark, el multiverso cuántico basado en la interpretación de muchos mundos de la mecánica cuántica, se alinea estrechamente con el tercer nivel epistemológico de la clasificación propuesta. Ambos se derivan de la idea de que cada evento cuántico conduce a una división del universo en múltiples ramas, cada una representando un resultado diferente [1]. La naturaleza epistemológica en este caso radica en que la existencia de estos mundos paralelos es una consecuencia de una interpretación particular de la teoría cuántica, una forma de entender la realidad cuántica y acoplarse a cada universo de los anteriores niveles. Como se señaló anteriormente, Este nivel representa un problema de universos redundantes.

Finalmente, el Nivel IV de Tegmark, el universo matemático, donde toda estructura matemática consistente existe físicamente, podría tener una correspondencia con el cuarto nivel ontológico de la clasificación propuesta. La idea de un espacio-tiempo discreto como base fundamental de la realidad, donde diferentes estructuras matemáticas discretas dan lugar a diferentes universos, se alinea con la noción de una existencia fundamental que abarca todas las posibilidades matemáticas consistentes. La distinción clave, sin embargo, es que a diferencia del modelo de Tegmark que no es claro sibre si su modelo del Nivel IV como una estructura matemática es o no una visión ontológica o epistemológica, en el nivel IV de este modelo, todo el universo es ontológicamente una función de onda universal, donde los Niveles I y II son en realidad los mismos que los del Nivel III <MWI=Multiverso Cosmológico>, imponiendo límites a la redundancia de universos, a la vez que se eliminan las limitaciones y problemas que presentan los modelos cosmológicos y la interpretación de Everett por separado.

La Tabla 2.1 resume esta comparación:

Tabla 2.1: Comparación de Clasificaciones del Multiverso

Nivel	Modelo Propuesto: Descripción (Epistemológico/Ontológico)	Modelo de Tegmark: Descripción	Diferencias Clave
1	Regiones Inobservables (Epistemológico)	Nivel I: Multiverso Acolchado	Énfasis en la limitación observacional como base de la clasificación en el modelo propuesto.
2	Universos con Diferentes Constantes Físicas (Epistemológico)	Nivel II: Multiverso Inflacionario	Se considera una limitación en nuestro conocimiento de las posibles leyes físicas.
3	Interpretaciones Cuánticas (Epistemológico)	Nivel III: Interpretación de Muchos Mundos de la Mecánica Cuántica	El modelo propuesto clasifica esto como una perspectiva limitada y subjetiva sobre la realidad cuántica al

			acoplarse al universo cosmológico, donde “multiverso cosmológico+MWI=multiverso redundantemente infinito”.
4	Espacio-Tiempo Discreto (Ontológico)	Nivel IV: Universo Matemático	El modelo propuesto especifica una base fundamental (espacio-tiempo discreto), mientras que Tegmark es más general. El modelo propuesto enfatiza la existencia fundamental, mientras que los niveles anteriores se centran en nuestra forma de conocer. En este nivel, el universo muestra su forma ontológica, donde “MWI=multiverso cosmológico”.

Esta tabla ilustra cómo la clasificación propuesta ofrece una perspectiva diferente sobre el multiverso, basada en la distinción entre nuestra capacidad de conocer y la naturaleza fundamental de la existencia, en contraste con la clasificación de Tegmark que se basa más en las propiedades físicas y la distancia observacional. Los siguientes capítulos explorarán en detalle los fundamentos de la cosmología cuántica y los conceptos relacionados que sustentan este modelo propuesto.

Capítulo 3: Principios Fundamentales de la Cosmología Cuántica

3.1 La Búsqueda de la Unificación: Mecánica Cuántica y Relatividad General

La cosmología cuántica se erige como una rama de la física teórica cuyo objetivo primordial es lograr una descripción unificada del universo mediante la fusión de los principios de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad general de Einstein [3]. Este empeño surge de la profunda comprensión de que estas dos teorías, pilares de la física moderna, aunque enormemente exitosas en sus respectivos dominios de aplicación, resultan fundamentalmente incompatibles cuando se aplican simultáneamente a escenarios extremos, como el universo temprano o el interior de los agujeros negros. La mecánica cuántica, que describe el comportamiento de la materia y la energía a escalas atómicas y subatómicas, se fundamenta en la cuantización de

las propiedades físicas y en la naturaleza probabilística de los fenómenos [39]. En contraste, la relatividad general describe la gravedad no como una fuerza, sino como la curvatura del espacio-tiempo causada por la presencia de masa y energía, presentando un universo determinista y clásico a gran escala [38].

Una de las incompatibilidades más significativas entre estas teorías radica en su tratamiento del tiempo [4]. En la mecánica cuántica, el tiempo se considera un parámetro clásico externo, un telón de fondo inmutable sobre el cual evolucionan los sistemas cuánticos según la ecuación de Schrödinger [69]. La relatividad general, por otro lado, integra el tiempo como la cuarta dimensión del espacio-tiempo, una entidad dinámica cuya velocidad de flujo depende de la curvatura del espacio-tiempo y de la trayectoria del observador [4]. Esta disparidad en la concepción del tiempo plantea un desafío fundamental para cualquier intento de unificación.

Otro obstáculo importante en la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad es el problema de la renormalización [74]. La cuantización de la gravedad utilizando las técnicas estándar de la teoría cuántica de campos conduce a la aparición de infinitos que no pueden ser eliminados mediante la renormalización, un procedimiento que funciona con éxito para otras fuerzas fundamentales como el electromagnetismo y las fuerzas nucleares débil y fuerte [39]. Esta no renormalizabilidad sugiere que la relatividad general, tal como se formula actualmente, podría ser una teoría efectiva válida solo a bajas energías y que una descripción más fundamental a energías más altas, donde los efectos cuánticos de la gravedad se vuelven significativos, requeriría un nuevo marco teórico.

La cosmología cuántica se erige como el campo donde esta unificación se vuelve particularmente crucial. Busca aplicar los principios de la mecánica cuántica al universo en su totalidad, especialmente en las etapas más tempranas de su existencia, cerca del Big Bang, donde se cree que los efectos cuánticos fueron dominantes [3]. Comprender el universo en estas condiciones extremas requiere una teoría que pueda describir la naturaleza cuántica del espacio-tiempo y la materia, superando las limitaciones de la relatividad general y la mecánica cuántica cuando se aplican por separado. La cosmología cuántica también tiene como objetivo abordar preguntas fundamentales sobre el origen del universo, la naturaleza del espacio-tiempo a la escala de Planck (aproximadamente 10⁻³⁵ metros) y el destino final del cosmos [3].

3.2 Conceptos y Formalismos Clave en Cosmología Cuántica

En el corazón de la cosmología cuántica se encuentra la idea de describir el estado cuántico del universo mediante una función de onda, análoga a la función de onda de una partícula en la mecánica cuántica estándar [3]. Sin embargo, a diferencia de la función de onda de una partícula que evoluciona en el espacio y el tiempo, la función

de onda del universo se define en un espacio abstracto de todas las posibles geometrías tridimensionales y configuraciones de campos de materia, conocido como superspacio [3]. La ecuación que se supone que debe satisfacer esta función de onda es la ecuación de Wheeler-DeWitt, una ecuación funcional diferencial que surge de la aplicación de los procedimientos de cuantización canónica a la formulación hamiltoniana de la relatividad general [3].

La ecuación de Wheeler-DeWitt, propuesta por John Wheeler y Bryce DeWitt en la década de 1960, representa un intento de cuantificar la gravedad al aplicar los principios de la mecánica cuántica al universo en su totalidad [3]. A diferencia de la ecuación de Schrödinger, la ecuación de Wheeler-DeWitt no contiene un parámetro de tiempo explícito, lo que refleja la naturaleza atemporal de la relatividad general a nivel fundamental [69]. En cambio, toma la forma de una ecuación de restricción, que impone ciertas condiciones que la función de onda del universo debe satisfacer. Las soluciones a esta ecuación describirían las amplitudes de probabilidad de encontrar el universo en una configuración particular de geometría y materia.

El concepto de superspacio es fundamental para la formulación de la cosmología cuántica. Es un espacio de dimensión infinita donde cada punto representa una posible geometría tridimensional del universo, junto con la configuración de todos los campos de materia presentes [3]. La función de onda del universo es un funcional definido en este superspacio, que asigna una amplitud de probabilidad a cada posible "universo". La evolución del universo cuántico se describe entonces como el movimiento de esta función de onda a través del superspacio.

Además de la ecuación de Wheeler-DeWitt, la cosmología cuántica también explora la importancia de las condiciones de contorno para el universo. En la cosmología clásica, las condiciones iniciales del universo se deben postular externamente. La cosmología cuántica busca proporcionar una manera de determinar estas condiciones iniciales a partir de principios fundamentales. Una propuesta influyente en este sentido es la propuesta de no frontera de Hartle-Hawking [3]. Esta propuesta sugiere que la historia del universo es una variedad espacio-temporal compacta sin frontera, análoga a la superficie de una esfera. Esto elimina la necesidad de una singularidad inicial y proporciona una descripción más natural del origen del universo a partir de un estado cuántico.

3.3 Principales Desafíos y Preguntas Abiertas

A pesar de sus ambiciosos objetivos, la cosmología cuántica enfrenta numerosos desafíos conceptuales y técnicos. Uno de los más notorios es el "problema del tiempo" [69]. Como se mencionó anteriormente, la ecuación de Wheeler-DeWitt no contiene un parámetro de tiempo explícito, lo que dificulta la descripción de la evolución temporal

del universo que observamos. Se han propuesto varias soluciones a este problema, como la identificación de una variable intrínseca dentro del formalismo que pueda actuar como un reloj o el estudio de la evolución semiclássica donde el tiempo emerge de manera aproximada.

Otro desafío importante es el problema de la singularidad del Big Bang [23]. La cosmología clásica, basada en la relatividad general, predice que el universo surgió de un estado de densidad y curvatura infinitas hace unos 13.800 millones de años. Esta singularidad representa un punto donde las leyes de la física tal como las conocemos dejan de ser válidas. La cosmología cuántica ofrece la esperanza de resolver esta singularidad reemplazándola con un comportamiento cuántico más suave, como un "gran rebote" en la gravedad cuántica de bucles, donde una fase de contracción previa es seguida por una fase de expansión [23].

La interpretación de la función de onda del universo también presenta un desafío significativo. A diferencia de la función de onda de un sistema cuántico típico, no hay un observador externo al universo que pueda realizar mediciones y causar un colapso de la función de onda (si se adhiere a la interpretación de Copenhague). Esto plantea preguntas sobre cómo se relaciona la función de onda del universo con la realidad clásica que observamos y si se requiere una interpretación diferente de la mecánica cuántica en un contexto cosmológico.

Además, la cosmología cuántica carece en gran medida de verificación experimental directa [26]. Las energías involucradas en el universo temprano y a la escala de Planck están muy lejos de lo que podemos sondear con los experimentos actuales. Esto dificulta la prueba de las predicciones de las teorías de la cosmología cuántica y la distinción entre diferentes modelos. Sin embargo, algunos investigadores esperan que los efectos cuánticos de la gravedad puedan dejar huellas sutiles en el fondo cósmico de microondas o en la distribución a gran escala de galaxias, que podrían detectarse con futuras observaciones.

Finalmente, el problema del paisaje se refiere a la vasta cantidad de posibles soluciones a las ecuaciones de la teoría de cuerdas, cada una correspondiente a un universo con diferentes constantes físicas [3]. Esto plantea la cuestión de por qué nuestro universo tiene las constantes que observamos y si existe algún principio que seleccione un universo particular de este vasto paisaje. La cosmología cuántica podría desempeñar un papel en la comprensión de la probabilidad de diferentes universos dentro de este paisaje.

Capítulo 4: El Problema de la Medición y la Interpretación de Muchos Mundos

4.1 El Enigma de la Medición en Mecánica Cuántica

Uno de los problemas más desconcertantes y debatidos en los fundamentos de la mecánica cuántica es el problema de la medición [19]. La mecánica cuántica describe los sistemas físicos mediante una función de onda que evoluciona de forma determinista según la ecuación de Schrödinger como una superposición lineal de diferentes estados [19]. Sin embargo, cuando se realiza una medición en un sistema cuántico, siempre se encuentra en un estado definido único, en lugar de en una superposición de todos los estados posibles [19]. Este tránsito de una superposición a un resultado definido es lo que se conoce como colapso de la función de onda, y el problema de la medición radica en describir qué es exactamente lo que causa este colapso y cómo ocurre.

El experimento mental del gato de Schrödinger [10] ilustra vívidamente este problema. En este escenario, un gato está encerrado en una caja con un dispositivo que liberará un veneno si un átomo radiactivo decae. Según la mecánica cuántica, hasta que se abra la caja y se observe el sistema, el átomo está en una superposición de estados decaído y no decaído, y por lo tanto, el gato también está en una superposición de estados vivo y muerto [19]. Sin embargo, al abrir la caja, solo encontramos al gato vivo o muerto, nunca en una combinación de ambos. La pregunta es, ¿cómo pasa el sistema de esta superposición indefinida a un único resultado definido? ¿Cuándo ocurre la medición? ¿Fue en el momento en que el gato fue observado?

La interpretación estándar de Copenhague de la mecánica cuántica postula que la medición juega un papel especial en la teoría, causando un colapso no unitario e irreversible del estado cuántico [68]. Según esta interpretación, el mundo cuántico se rige por las leyes de la probabilidad hasta que se realiza una medición por un observador clásico, momento en el cual el sistema "elige" un estado definido. Sin embargo, esta interpretación ha sido criticada por su falta de claridad sobre qué constituye exactamente una medición y el papel del observador [19]. Además, la división fundamental entre un sistema cuántico y un observador clásico parece ad hoc y no está bien definida dentro de la teoría.

4.2 La Interpretación de Muchos Mundos: Un Marco Alternativo

La interpretación de muchos mundos (MWI), propuesta originalmente por Hugh Everett III en 1957, ofrece una solución radical al problema de la medición al sugerir que nunca ocurre un colapso de la función de onda [1]. En cambio, la MWI postula que todos los posibles resultados de una medición cuántica se realizan físicamente, cada uno en una rama separada del universo [1]. Según esta interpretación, el universo evoluciona de forma determinista según la ecuación de Schrödinger, y el acto de medición es simplemente una interacción entre el sistema cuántico y el aparato de medición (que incluye al observador), lo que lleva a un estado de superposición en el que todas las posibles historias se vuelven reales, pero en mundos paralelos que no interactúan.

El fenómeno de la decoherencia juega un papel crucial en la MWI para explicar por qué no somos conscientes de estos otros mundos [8]. La decoherencia es el proceso por el cual un sistema cuántico interactúa con su entorno, lo que hace que pierda coherencia cuántica y se comporte de forma más clásica. En el contexto de la MWI, la decoherencia provoca una ramificación del universo en mundos distintos que ya no interfieren entre sí. Cada rama contiene un resultado definido de la medición, y el observador se encuentra enredado con una de estas ramas, percibiendo solo el resultado correspondiente [8].

La MWI tiene implicaciones profundas para nuestra comprensión de la realidad. Sugiere que el universo no es único, sino un vasto multiverso en constante ramificación donde todas las posibilidades cuánticas se desarrollan. Cada elección o evento cuántico conduce a una división, creando un número inmenso y creciente de mundos paralelos [8]. Esta interpretación elimina la necesidad de un colapso de la función de onda y proporciona una descripción unitaria y determinista de la evolución cuántica del universo en su conjunto [8].

4.3 Desafíos y Críticas de la Interpretación de Muchos Mundos

A pesar de su elegancia y su capacidad para resolver el problema de la medición, la MWI no está exenta de desafíos y críticas [12]. Una de las principales objeciones es el problema de la base preferida [87]. La MWI postula una ramificación del universo en diferentes mundos, pero no especifica de forma única en qué base (es decir, qué conjunto de estados cuánticos) ocurre esta ramificación. Si bien la decoherencia ayuda a seleccionar una base "efectiva" para los objetos macroscópicos, no proporciona una base fundamental preferida a nivel cuántico.

Otro desafío es la dificultad para definir y contar los mundos [12]. Si cada evento cuántico conduce a una división, el número de mundos paralelos debe ser inmenso, quizás infinito. Esto plantea preguntas sobre la naturaleza de estos mundos, su relación entre sí y si todos son igualmente "reales". Algunos críticos argumentan que la proliferación de universos no observables es una extravagancia ontológica que viola la navaja de Occam [87].

Un problema particularmente espinoso para la MWI es la derivación de probabilidades objetivas, específicamente la regla de Born [8]. La regla de Born establece que la probabilidad de obtener un resultado particular en una medición cuántica está dada por el cuadrado de la amplitud de la función de onda para ese resultado. En la mecánica cuántica estándar, esta regla se postula. Sin embargo, en la MWI, donde todos los resultados ocurren en diferentes mundos, no está claro por qué deberíamos asignar probabilidades a estos resultados, ya que todos son ciertos en algún mundo. Además, incluso si aceptamos la necesidad de probabilidades, ¿por qué deberían estar dadas

por la regla de Born?

Se han propuesto varios intentos para derivar la regla de Born dentro del marco de la MWI. Un enfoque se basa en argumentos frecuentistas, sugiriendo que en el límite de muchas mediciones, las ramas que no obedecen la regla de Born tendrían una medida de existencia que tiende a cero [8]. Otro enfoque utiliza la teoría de la decisión, argumentando que un agente racional debería actuar como si la regla de Born fuera verdadera para maximizar su utilidad esperada en apuestas cuánticas [8]. También se han propuesto derivaciones basadas en la incertidumbre autolocalizada [8] y el conteo de ramas [8]. Sin embargo, estas derivaciones siguen siendo controvertidas y han enfrentado críticas por circularidad o por depender de suposiciones adicionales [92].

Finalmente, la MWI enfrenta el llamado "problema de la incoherencia", que pregunta por qué deberíamos asignar probabilidades a resultados que son ciertos que ocurrirán en algunos mundos, y el "problema cuantitativo", que pregunta por qué las probabilidades deberían estar dadas por la regla de Born [8]. A pesar de estos desafíos, la MWI sigue siendo una de las interpretaciones más influyentes y debatidas de la mecánica cuántica, y su relación con la cosmología cuántica y la naturaleza del multiverso continúa siendo un área activa de investigación.

Capítulo 5: Tiempo y Realidad: El Universo Bloque en Cosmología Cuántica

5.1 El Concepto del Universo Bloque

La teoría del universo bloque, también conocida como eternalismo, presenta una perspectiva radical sobre la naturaleza del tiempo, sugiriendo que todos los momentos en el tiempo (pasado, presente y futuro) existen simultáneamente en un bloque tetradimensional de espacio-tiempo [71]. En este modelo, el tiempo no fluye objetivamente, y el universo no cambia; más bien, todos los eventos que han ocurrido, están ocurriendo y ocurrirán están igualmente presentes dentro de este bloque estático [71]. Nuestra percepción del paso del tiempo y del cambio se considera una ilusión psicológica, similar a cómo una película presenta una serie de fotogramas estáticos que crean la ilusión de movimiento [71].

Esta visión del tiempo surge naturalmente de la teoría de la relatividad especial de Einstein, que trata el tiempo como una dimensión más, en pie de igualdad con las tres dimensiones espaciales, formando un continuo espacio-temporal [4]. La relatividad especial demostró que la simultaneidad no es absoluta, sino que depende del marco de referencia del observador [72]. Lo que un observador considera como "ahora" puede ser el pasado o el futuro para otro observador que se mueve a una velocidad relativa diferente. Esta relatividad de la simultaneidad sugiere que no hay un "presente"

universalmente definido, lo que apoya la idea de que todos los momentos en el tiempo tienen el mismo estatus ontológico [73].

La teoría del universo bloque contrasta marcadamente con otras concepciones del tiempo, como el presentismo, que sostiene que solo el momento presente es real, y el pasado y el futuro no existen [73], y la teoría del bloque creciente, que postula que el pasado y el presente existen, pero el futuro aún no se ha materializado [73]. Mientras que el presentismo se alinea más con nuestra intuición cotidiana del tiempo como algo que fluye, la teoría del universo bloque se considera una consecuencia natural de la teoría de la relatividad [71].

La preeminencia del universo bloque como marco conceptual central en esta tesis se fundamenta en su coherencia intrínseca con un universo determinista. En contraste, un universo que evoluciona de manera indeterminista presenta serias dificultades conceptuales. La naturaleza inherentemente aleatoria de su desarrollo conlleva una arbitrariedad y un sesgo que dificultan la definición de un principio o un final bien definidos para el universo, o incluso ambos, con apariencia de infinitos. Esta falta de una trayectoria evolutiva predecible y consistente plantea desafíos significativos para su integración con teorías fundamentales como la relatividad general y la mecánica cuántica.

Por otro lado, en el contexto de un universo determinista, las concepciones alternativas del tiempo, como el presentismo y la teoría del bloque creciente, se enfrentan a desafíos adicionales. Si bien el presentismo postula un presente ontológicamente privilegiado, y la teoría del bloque creciente sugiere un pasado y presente existentes con un futuro aún por materializar, ambas perspectivas resultan problemáticas bajo un determinismo estricto. En particular, la idea de un universo determinista que sea crecientemente bloque se enfrenta a la limitación impuesta por la finitud, aunque inmensa, del número de posibles estados del universo. Dada esta finitud, la secuencia de estados inevitablemente se repetiría en algún momento, lo que implicaría una naturaleza cíclica de la evolución temporal. Esta repetición esencialmente transforma un universo creciente en uno de bloque, donde todos los momentos están interconectados en un patrón predeterminado.

En este sentido, dentro de un modelo determinista, concepciones como el presentismo y el bloque creciente pueden interpretarse como visiones parciales o epistemológicas de una realidad temporal más fundamental y completa: el universo bloque. En esta perspectiva, todos los momentos temporales, pasados, presentes y futuros, coexisten como entidades igualmente reales, una consecuencia lógica de la naturaleza determinista de los procesos físicos tal como se exploran en esta tesis.

5.2 Implicaciones para la Naturaleza del Tiempo y la Causalidad

La concepción del universo como un bloque estático tiene profundas implicaciones para nuestra comprensión de la naturaleza del tiempo y la causalidad. Si todos los momentos existen simultáneamente, la noción del "paso" del tiempo se convierte en un enigma. Algunos filósofos y físicos sugieren que nuestra percepción del tiempo que fluye es simplemente una función de nuestra conciencia o del aumento de la entropía en el universo, que define una dirección del tiempo termodinámica [71]. Desde esta perspectiva, el pasado nos parece fijo porque tenemos recuerdos de él, mientras que el futuro nos parece incierto porque aún no lo hemos experimentado, pero en realidad, ambos existen dentro del bloque espacio-temporal [109].

La idea del universo bloque también plantea interrogantes sobre el libre albedrío [72]. Si el futuro ya existe, predeterminado dentro del bloque, ¿tenemos realmente la capacidad de tomar decisiones que alteren el curso de los acontecimientos? Algunos defensores del universo bloque argumentan de manera errónea que el libre albedrío y el determinismo pueden coexistir, sugiriendo que nuestras elecciones son simplemente parte de la estructura preexistente del bloque, aunque no seamos conscientes de ello [111]. Otros sostienen que el universo bloque implica una forma de fatalismo, donde todas nuestras acciones y sus resultados ya están fijados.

La causalidad, la relación entre causa y efecto, también se interpreta de manera diferente en el contexto de un universo bloque [111]. En una visión tradicional, las causas preceden a los efectos en el tiempo. Sin embargo, en un bloque donde el tiempo no fluye de forma lineal, la causalidad puede verse más como una red de interconexiones a través del espacio-tiempo. Un evento en un punto del bloque puede estar causalmente relacionado con eventos en otros puntos, independientemente de su separación temporal en nuestra percepción. Algunos incluso han explorado la posibilidad de la retrocausalidad, donde los eventos futuros podrían influir en el pasado, dentro de este marco [126].

5.3 El Universo Bloque en Relación con la Cosmología Cuántica y la Interpretación de Muchos Mundos

La relación entre el universo bloque y la cosmología cuántica es compleja y depende en gran medida de la interpretación de la mecánica cuántica que se adopte [112]. La naturaleza probabilística de la mecánica cuántica, tal como se expresa en la interpretación de Copenhague con su colapso de la función de onda, parece estar en tensión con la naturaleza determinista y estática del universo bloque [108]. Si el futuro ya está escrito en el bloque, ¿cómo se acomoda la aleatoriedad inherente a los eventos cuánticos?

La interpretación de muchos mundos (MWI) de la mecánica cuántica, sin embargo, parece encajar de forma más natural con el concepto de un universo bloque [12]. En la

MWI, cada evento cuántico conduce a una ramificación del universo, creando múltiples mundos paralelos donde todos los resultados posibles se realizan [1]. Dentro del marco de un universo bloque, estas ramificaciones podrían verse como diferentes líneas de tiempo o historias coexistiendo dentro del bloque espacio-temporal, creando un bloque "multiverso" donde no solo todo el pasado, presente y futuro existen, sino también todas las posibles variaciones de estos [113], lo que da como resultado un universo cuántico con una curva de tiempo cerrada (CTC).

Es interesante notar que el propio Hugh Everett, el proponente original de la MWI, puede no haber estado completamente a favor de la terminología de "muchos mundos", prefiriendo quizás una visión de un único mundo cuántico descrito por una función de onda universal dentro de un universo bloque [13]. Desde esta perspectiva, las diferentes "ramas" de la función de onda podrían no representar universos separados, sino más bien diferentes componentes de un único estado cuántico universal que coexisten dentro del bloque espacio-temporal. La decoherencia explicaría por qué estos componentes parecen clásicos y no interactúan a nivel macroscópico.

En resumen, la teoría del universo bloque ofrece una perspectiva provocadora sobre la naturaleza del tiempo y la realidad, con profundas implicaciones para la causalidad, el libre albedrío y nuestra comprensión del universo. Su relación con la cosmología cuántica y la interpretación de muchos mundos sugiere un marco donde todas las posibilidades cuánticas podrían coexistir dentro de un bloque espacio-temporal eterno, aunque la naturaleza precisa de esta coexistencia y su compatibilidad con la naturaleza fundamentalmente probabilística de la mecánica cuántica siguen siendo temas de debate e investigación.

Capítulo 6: Hacia una Teoría Cuántica de la Gravedad y el Espacio-Tiempo Discreto

6.1 Principales Candidatos: Gravedad Cuántica de Bucles y Teoría de Cuerdas

La búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad, que unifique la mecánica cuántica con la relatividad general, ha llevado al desarrollo de varios enfoques teóricos, siendo la gravedad cuántica de bucles (LQG) [23] y la teoría de cuerdas [1] dos de los candidatos más prominentes [39].

La gravedad cuántica de bucles es un intento de cuantificar directamente la gravedad basándose en la formulación geométrica de la relatividad general de Einstein, en lugar de tratar la gravedad como una fuerza mediada por partículas [28]. En LQG, la estructura del espacio y el tiempo se considera compuesta de bucles finitos entrelazados en una red extremadamente fina llamada red de espín [28]. La evolución de una red de espín en el tiempo da lugar a una espuma de espín. Una característica clave de LQG es que

postula que el espacio y el tiempo son discretos a la escala de Planck (aproximadamente 10⁻³⁵ metros), lo que significa que existen unidades fundamentales indivisibles de volumen y tiempo [28]. LQG se considera formalmente independiente del fondo, lo que significa que sus ecuaciones no dependen de un espacio y tiempo preexistentes [28]. Una de las fortalezas de LQG es su tratamiento de las singularidades en la relatividad general, como la del Big Bang, que la teoría reemplaza con un "gran rebote" [23]. Sin embargo, LQG aún se encuentra en desarrollo y carece de verificación experimental directa a energías accesibles [29].

La teoría de cuerdas, por otro lado, aborda la unificación de todas las fuerzas fundamentales, incluida la gravedad, reemplazando las partículas puntuales de la física de partículas con objetos unidimensionales llamados cuerdas [40]. Diferentes modos de vibración de estas cuerdas corresponden a diferentes partículas, incluido el gravitón, la partícula hipotética que mediaría la fuerza gravitatoria [27]. La teoría de cuerdas requiere la existencia de dimensiones espaciales adicionales, típicamente diez en total, con seis de ellas compactificadas a escalas muy pequeñas [41]. Si bien la teoría de cuerdas ha logrado avances significativos en la física matemática y ha proporcionado información sobre la física de los agujeros negros y la cosmología temprana [40], también enfrenta desafíos, incluida la falta de una definición completa en todas las circunstancias y la existencia de un vasto "paisaje" de posibles universos, lo que dificulta la realización de predicciones específicas para nuestro universo [40]. Al igual que LQG, la teoría de cuerdas aún no ha sido verificada experimentalmente a las energías requeridas para sondear la escala de cuerdas (aproximadamente la longitud de Planck) [44].

6.2 El Concepto de Espacio-Tiempo Discreto en Gravedad Cuántica

La idea de que el espacio y el tiempo podrían no ser continuos sino discretos a escalas muy pequeñas es una característica común que surge en varios enfoques de la gravedad cuántica, incluida la LQG y potencialmente la teoría de cuerdas [3]. En un espacio-tiempo continuo, se puede dividir cualquier región de volumen en regiones cada vez más pequeñas hasta el infinito. Sin embargo, la idea de un espacio-tiempo discreto postula que existe un "volumen posible más pequeño" que ya no es divisible [30]. De manera similar, podría haber una "unidad de tiempo" más pequeña, un "cronón", más allá de la cual el tiempo no puede dividirse más [60].

En la gravedad cuántica de bucles, la discretización del espacio-tiempo surge naturalmente de la estructura de las redes de espín [28], S_SS150[31]. Los nodos de la red de espín pueden interpretarse como cuantos de volumen, y los enlaces como cuantos de área. El tamaño de estos cuantos está en el orden de la longitud de Planck al cubo para el volumen y la longitud de Planck al cuadrado para el área [28]. Esto implica que el espacio mismo tiene una estructura granular a esta escala fundamental, y que las longitudes, áreas y volúmenes están cuantificados, tomando solo valores discretos.

Si bien la teoría de cuerdas originalmente se formuló en un fondo espacio-temporal continuo, algunas investigaciones sugieren que a la escala de Planck, el espacio-tiempo podría tener una naturaleza emergente y posiblemente discreta [38]. El principio holográfico, que surgió de la teoría de cuerdas, sugiere que la información contenida en un volumen de espacio puede codificarse en un límite de menor dimensión, lo que podría implicar que la dimensionalidad y la continuidad del espacio-tiempo son ilusorias a nivel fundamental [38].

Uno de los beneficios potenciales de un espacio-tiempo discreto es su capacidad para resolver las singularidades que aparecen en la relatividad general, como la singularidad del Big Bang o las singularidades dentro de los agujeros negros [33]. Si existe una longitud mínima y un volumen mínimo, entonces la densidad no puede volverse infinita. En la gravedad cuántica de bucles, por ejemplo, el Big Bang es reemplazado por un Big Bounce, donde el universo pasa de una fase de contracción a una de expansión, evitando la singularidad [23].

6.3 Integrando la Gravedad Cuántica con un Modelo de Espacio-Tiempo Discreto

La integración de una teoría cuántica de la gravedad con un modelo de espacio-tiempo discreto en el contexto de la cosmología cuántica presenta un desafío formidable pero potencialmente fructífero. Tanto la gravedad cuántica de bucles como la teoría de cuerdas, con sus implicaciones inherentes o potenciales para un espacio-tiempo discreto, podrían integrarse en el marco de la cosmología cuántica para proporcionar una descripción más fundamental del universo en sus orígenes y a las escalas más pequeñas.

En la gravedad cuántica de bucles, el formalismo de la cosmología cuántica de bucles (LQC) ya ha logrado avances significativos en la aplicación de los principios de LQG a modelos cosmológicos [23]. LQC reemplaza la singularidad del Big Bang con un Big Bounce y proporciona un marco para estudiar la evolución temprana del universo con un espacio-tiempo discreto [23]. La ecuación de Wheeler-DeWitt, en el contexto de LQC, se reemplaza por una ecuación de diferencia que refleja la naturaleza discreta del espacio-tiempo.

La integración de la teoría de cuerdas con un espacio-tiempo discreto y la cosmología cuántica es más compleja. Si bien la teoría de cuerdas en sí misma no postula inherentemente un espacio-tiempo discreto, el principio holográfico, que es una consecuencia de la teoría de cuerdas, sugiere que la descripción de un volumen de espacio puede codificarse en un límite de menor dimensión, lo que podría implicar una estructura discreta subyacente [38]. La correspondencia AdS/CFT es un ejemplo específico de esto, que relaciona una teoría de la gravedad en un espacio anti-de Sitter con una teoría cuántica de campos conforme en su límite [45]. Esto sugiere que la

gravedad y el espacio-tiempo en el "bulk" (el espacio anti-de Sitter) podrían emerger de una teoría cuántica que vive en el límite, que podría tener una estructura discreta.

Además, la introducción menciona el concepto de un "espacio cuántico" [147] con propiedades discretas de tiempo y puntos de energía como una posible alternativa. Esta idea, basada en una "Teoría del Todo del Espacio Cuántico" (ToE), postula que el universo surgió de una singularidad inicial que podría ser una cierta estructura creada por el propio espacio cuántico, que se describe como una estructura sin pérdida de energía fuera del tiempo, posiblemente con un "lapso de tiempo congelado" en cada punto de energía [147]. Si bien esta es una propuesta especulativa, sugiere otra forma en que la discretización podría desempeñar un papel fundamental en la cosmología cuántica.

Integrar estos enfoques en un modelo coherente de cosmología cuántica con un espacio-tiempo discreto sigue siendo un desafío importante. Se requiere una comprensión más profunda de la naturaleza fundamental del espacio, el tiempo y la gravedad a la escala de Planck, así como el desarrollo de las herramientas matemáticas y conceptuales necesarias para describir el universo en estas condiciones extremas. Sin embargo, el potencial de tal integración para resolver algunas de las preguntas más profundas de la cosmología y la física teórica motiva la investigación continua en esta área.

Capítulo 7: Los Principios Holográfico y de Complementariedad en Gravedad Cuántica y Cosmología

7.1 El Principio Holográfico: Información en la Frontera

El principio holográfico [1] es una propiedad de las teorías de cuerdas y una supuesta propiedad de la gravedad cuántica que establece que la descripción de un volumen de espacio puede pensarse como codificada en un límite de menor dimensión de la región, como un horizonte de luz como un horizonte gravitacional [46]. Propuesto originalmente por Gerard 't Hooft, recibió una interpretación precisa en la teoría de cuerdas por Leonard Susskind, quien combinó sus ideas con las anteriores de 't Hooft y Charles Thorn [46]. Susskind dijo: "El mundo tridimensional de la experiencia ordinaria —el universo lleno de galaxias, estrellas, planetas, casas, rocas y personas— es un holograma, una imagen de la realidad codificada en una superficie bidimensional distante" [46].

El principio holográfico surgió de la termodinámica de los agujeros negros y el límite de Bekenstein [46]. El límite de Bekenstein conjetura que la entropía máxima en cualquier región escala con el radio al cuadrado, en lugar de al cubo como se podría esperar [46]. En el caso de un agujero negro, la idea fue que el contenido de información de todos

los objetos que han caído en el agujero podría estar contenido completamente en las fluctuaciones de la superficie del horizonte de eventos [46].

El ejemplo principal de holografía es la correspondencia AdS/CFT [45]. Esta es una relación conjeturada entre dos tipos de teorías físicas. Por un lado, están los espacios anti-de Sitter (AdS) que se utilizan en las teorías de la gravedad cuántica, formuladas en términos de la teoría de cuerdas o la teoría M. Por otro lado, están las teorías de campos conformes (CFT) que son teorías cuánticas de campos, incluidas teorías similares a las teorías de Yang-Mills que describen las partículas elementales [52]. La correspondencia AdS/CFT proporciona una formulación no perturbativa de la teoría de cuerdas con ciertas condiciones de contorno y es la realización más exitosa del principio holográfico [52]. Sugiere que una teoría de la gravedad en un espacio (d+1)-dimensional es equivalente a una teoría cuántica de campos en su límite d-dimensional [142].

El principio holográfico implica una conexión profunda entre la gravedad y la teoría cuántica de campos y sugiere que el espacio-tiempo mismo podría ser emergente de la información cuántica codificada en un límite [46].

7.2 El Principio de Complementariedad: ¿Dualidad Onda-Partícula a Escalas Cosmológicas?

El principio de complementariedad de Bohr [67] es un concepto fundamental en la mecánica cuántica que sostiene que ciertos pares de propiedades complementarias, como la posición y el momento o las propiedades ondulatorias y corpusculares, no pueden observarse o medirse simultáneamente en un mismo experimento [67]. Bohr consideró que una de las verdades fundamentales de la mecánica cuántica era el hecho de que la configuración de un experimento para medir una cantidad de un par, por ejemplo, la posición de un electrón, excluye la posibilidad de medir la otra, sin embargo, la comprensión de ambos experimentos es necesaria para caracterizar el objeto bajo investigación [151].

Si bien el principio de complementariedad se discute tradicionalmente en el contexto de sistemas microscópicos, sus principios subyacentes sobre las limitaciones de nuestra observación y la naturaleza dual de la realidad podrían ofrecer nuevas perspectivas en cosmología. La idea de un "principio de complementariedad gravitacional" [157] ha sido explorada, sugiriendo que la gravedad tiene características duales complementarias: los aspectos cuánticos y clásicos de la gravedad son complementarios y están absolutamente separados por la longitud de Planck en dominios planckianos y sobre-planckianos, respectivamente [157]. En este escenario, las ecuaciones clásicas de Einstein serían correctas a nivel fundamental en el dominio sobre-planckiano, y la gravedad cuántica estaría totalmente confinada al dominio planckiano con un nuevo

tipo de interacción de muy corto alcance [157].

7.3 ¿Emergencia del Espacio-Tiempo y la Regla de Born a partir de la Holografía y la Complementariedad?

El principio holográfico ofrece un marco potencial para comprender la emergencia del espacio-tiempo [33] a partir de una teoría más fundamental, no gravitacional, en el límite. La idea es que la geometría del espacio-tiempo en el "bulk" (el volumen) emerge de los grados de libertad cuánticos que viven en el "boundary" (la frontera) de menor dimensión. El principio holográfico establece que la entropía de la masa ordinaria (no solo los agujeros negros) también es proporcional al área de la superficie y no al volumen; que el volumen mismo es ilusorio y el universo es realmente un holograma que es isomorfo a la información "inscrita" en la superficie de su límite [46].

Se especula que la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica, tal como está codificada en la regla de Born [8], también podría ser un fenómeno emergente de una teoría determinista subyacente en el límite holográfico. Se han realizado varios intentos para derivar la regla de Born dentro del contexto de la MWI [8], y algunos sugieren que podría surgir de la estructura de entrelazamiento cuántico en la teoría del límite [133].

El principio de complementariedad podría complementar esta imagen al sugerir que nuestra descripción del universo a diferentes escalas (cuántica vs. clásica, gravedad vs. no gravedad) requiere perspectivas complementarias que no son simultáneamente accesibles. La emergencia del espacio-tiempo y la regla de Born podrían ser aspectos complementarios de una descripción más fundamental de la realidad, revelándose en diferentes límites o bajo diferentes "configuraciones experimentales" (en un sentido cosmológico).

En resumen, el principio holográfico ofrece un marco prometedor para comprender la emergencia del espacio-tiempo y la gravedad a partir de la información cuántica, y se especula que la regla de Born, que describe la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica, también podría surgir de este marco. El principio de complementariedad podría proporcionar una perspectiva adicional sobre cómo diferentes aspectos de la realidad, como el espacio-tiempo y la probabilidad cuántica, se relacionan entre sí en una teoría fundamental de la gravedad cuántica y la cosmología.

Capítulo 8: Interpretaciones Alternativas: Mecánica Bohmiana y el Multiverso Cuántico

8.1 Mecánica Bohmiana: Una Teoría de Variables Ocultas

La mecánica bohmiana, también conocida como teoría de ondas piloto o teoría de De Broglie-Bohm [1], es una interpretación de la mecánica cuántica que postula la existencia

de trayectorias de partículas definidas, guiadas por una función de onda [160]. A diferencia de la interpretación de Copenhague, la mecánica bohmiana proporciona una descripción determinista de los fenómenos cuánticos sin recurrir al colapso de la función de onda durante la medición [160]. En esta teoría, un sistema de partículas se describe tanto por su función de onda, que evoluciona según la ecuación de Schrödinger, como por las posiciones reales de las partículas, que evolucionan según una ecuación de guía que depende de la función de onda [160].

La mecánica bohmiana resuelve el problema de la medición al postular que las partículas siempre tienen posiciones definidas, incluso cuando no se observan [160]. El resultado de una medición cuántica está determinado por la posición inicial de la partícula y la evolución de la función de onda del sistema, ambos determinados de forma única por las condiciones iniciales. La naturaleza probabilística que observamos en los experimentos cuánticos surge de nuestra ignorancia de las posiciones iniciales precisas de las partículas, que se supone que están distribuidas según la densidad de probabilidad dada por el cuadrado de la amplitud de la función de onda (la regla de Born) [160]. En la mecánica bohmiana, la regla de Born no es un postulado fundamental, sino que se demuestra que surge de una condición de "equilibrio cuántico" sobre la distribución inicial de las posiciones de las partículas [160].

El movimiento de las partículas está gobernado por la ecuación de guía, que implica un potencial cuántico derivado de la función de onda [160]. Este potencial cuántico es responsable de los efectos cuánticos, como la interferencia en el experimento de la doble rendija, al influir en las trayectorias de las partículas de una manera no clásica. Una característica importante de la mecánica bohmiana es su no localidad explícita: la velocidad de cualquier partícula depende de la función de onda del sistema completo, que a su vez depende de las posiciones de todas las demás partículas, independientemente de su separación [160].

8.2 Críticas a la Mecánica Bohmiana: No Localidad y Superdeterminismo

A pesar de su capacidad para proporcionar una interpretación realista y determinista de la mecánica cuántica, la mecánica bohmiana ha enfrentado varias críticas [161]. Una de las objeciones más comunes es su no localidad explícita [160]. La dependencia instantánea de la velocidad de una partícula en las posiciones de todas las demás partículas en el universo parece estar en conflicto con los principios de la relatividad especial, que establece que ninguna información o influencia puede viajar más rápido que la velocidad de la luz [160]. Si bien se han propuesto formulaciones relativistas de la mecánica bohmiana [161], a menudo requieren la introducción de una foliación privilegiada del espacio-tiempo, lo que parece violar la invarianza de Lorentz.

Otra crítica se centra en la asimetría en el tratamiento de la posición y el momento [170].

En la mecánica bohmiana, la posición es la variable fundamental que siempre tiene un valor definido, mientras que el momento se define de forma secundaria a través de la función de onda. Algunos argumentan que esto no trata a estas variables conjugadas de manera equitativa, lo que contrasta con el papel simétrico que juegan en la formulación estándar de la mecánica cuántica.

La mecánica bohmiana también se ha relacionado con el concepto de superdeterminismo [126]. El superdeterminismo es una posible laguna en el teorema de Bell que permitiría una teoría de variables ocultas locales que reproduzca las predicciones de la mecánica cuántica al postular que las elecciones de las configuraciones de medición no son estadísticamente independientes de las variables ocultas que determinan los resultados de la medición [173]. Si bien la mecánica bohmiana en sí misma es una teoría no local, algunos han sugerido que podría requerir una forma de superdeterminismo para ser consistente con todos los fenómenos cuánticos, lo que implicaría una falta de libre albedrío para los experimentadores al elegir las configuraciones de medición [126].

8.3 Mecánica Bohmiana y el Modelo Propuesto del Multiverso Cuántico

La mecánica bohmiana, con su descripción de un solo mundo que evoluciona de forma determinista guiado por una función de onda no local, ofrece una perspectiva contrastante e insatisfactoria con la interpretación de muchos mundos inherente a algunos modelos de multiverso. Mientras que la MWI postula la existencia real de todas las ramas de la función de onda como universos separados, la mecánica bohmiana se adhiere a la idea de una sola realidad objetiva donde las partículas tienen trayectorias definidas [160].

Sin embargo, algunos han argumentado que la mecánica bohmiana podría considerarse una "teoría de muchos mundos en negación" [160]. En la mecánica bohmiana, la función de onda del universo contiene información sobre todas las posibles configuraciones de partículas, y las ramas de la función de onda que no contienen la configuración real de las partículas todavía influyen en el movimiento de las partículas a través del potencial cuántico. Estas "ramas vacías" o "mundos vacíos" [160] no contienen partículas, pero son parte de la función de onda universal y desempeñan un papel en la dinámica del mundo "real" que contiene las partículas.

Otra área de tensión significativa para la mecánica bohmiana se encuentra en su relación con las teorías cosmológicas modernas. La mayoría de los principales marcos teóricos actuales, como la cosmología cíclica, la cosmología inflacionaria, la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles (LQG), que tienden a favorecer o incluso implicar la existencia de un multiverso como una consecuencia natural de sus principios fundamentales. La mecánica bohmiana, con su compromiso con una única realidad

objetiva y un solo universo evolucionando, se presenta como una excepción a esta tendencia dominante. En relación con el modelo propuesto del multiverso cuántico, la mecánica bohmiana, con su enfoque en una sola realidad objetiva guiada por una función de onda que abarca todas las posibilidades, podría alinearse con el nivel ontológico que se plantea en esta tesis, aunque de manera forzada y no sin la ausencia de problemas. Las "ramas vacías" de la función de onda, que codifican otras posibles historias o resultados cuánticos, no podrían relacionarse con los niveles epistemológicos, ni siquiera representando diferentes perspectivas o formas en que el universo podría haber sido o podría ser, aunque solo una de estas posibilidades se realiza con las partículas reales, debido a su naturaleza determinista e inherentemente de un solo mundo.

Además, una crítica fundamental a la mecánica bohmiana surge de su aparente dificultad para dar una explicación satisfactoria del poder computacional de la computación cuántica. A diferencia de la Interpretación de Muchos Mundos (MWI), que encuentra una explicación natural para la eficiencia de los algoritmos cuánticos en la superposición y el procesamiento paralelo de múltiples mundos, la mecánica bohmiana, al ser una teoría de un solo mundo con trayectorias de partículas definidas, tiene dificultades para explicar la potencia de cálculo cuántica sin invocar explícitamente el principio de superposición como un elemento ontológico fundamental. Esto plantea interrogantes sobre la capacidad de la mecánica bohmiana para proporcionar una descripción completa de todos los aspectos de los fenómenos cuánticos, incluyendo aquellos explotados por la computación cuántica.

La tensión entre la no localidad de la mecánica bohmiana y la localidad inherente a la relatividad sigue siendo un desafío importante para esta interpretación. Su capacidad para proporcionar una descripción determinista de los fenómenos cuánticos sin el problema de la medición la convierte en una alternativa poco viable pero ciertamente intrigante a la interpretación estándar y a la MWI, ofreciendo una perspectiva única sobre la naturaleza de la realidad cuántica y su posible relación con un modelo de multiverso.

Finalmente, es crucial señalar una diferencia fundamental en el tratamiento de las probabilidades objetivas entre la mecánica bohmiana y la MWI. La Interpretación de Muchos Mundos se distingue por su intento de proporcionar una base ontológica para las probabilidades que observamos en la mecánica cuántica, vinculándolas a la medida de existencia o al peso de cada rama del universo. En contraste, la mecánica bohmiana, al igual que otras interpretaciones como la de Copenhague, generalmente asume la validez de la regla de Born para obtener probabilidades sin ofrecer una explicación ontológica fundamental de por qué las probabilidades cuánticas tienen los valores que tienen. Si bien la mecánica bohmiana proporciona trayectorias

deterministas para las partículas, la distribución inicial de estas y la forma de la función de onda que las guía se asumen de acuerdo con la regla de Born, incorporando así la probabilidad sin explicar su origen ontológico de manera intrínseca a la teoría.

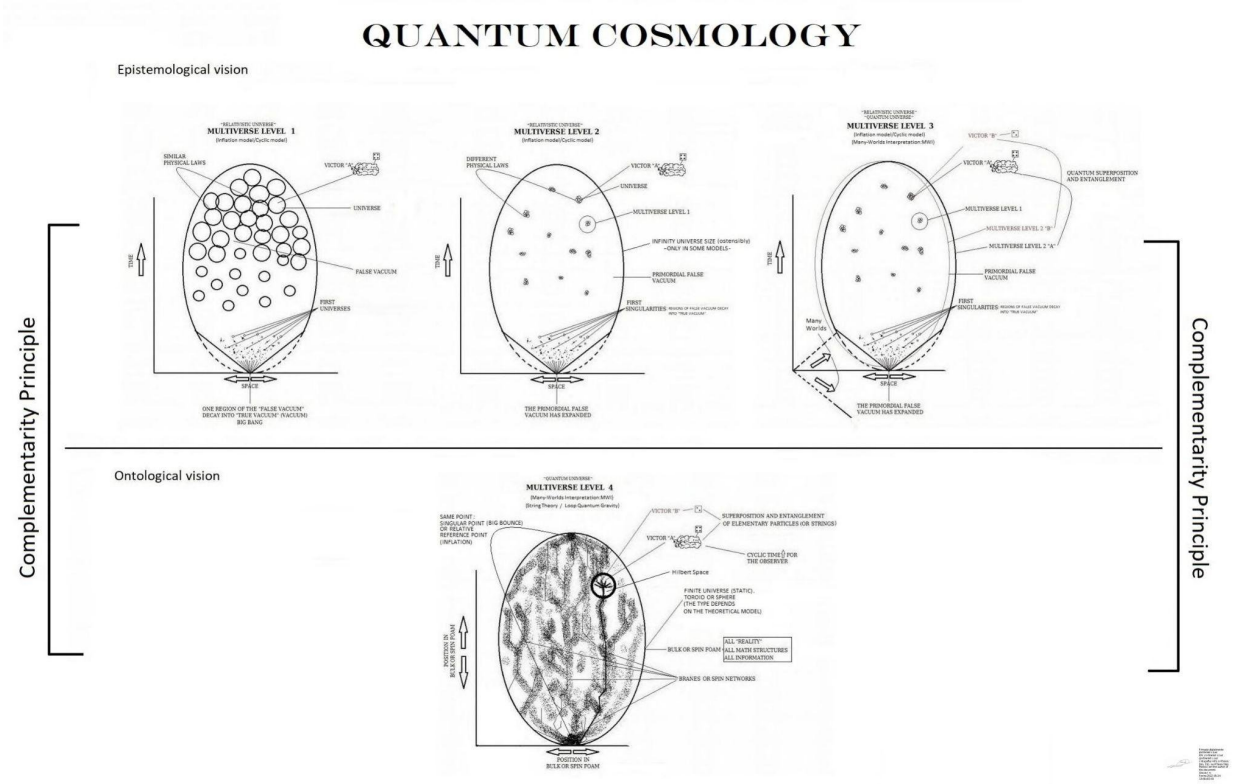
Capítulo 9: Síntesis y el Modelo Propuesto del Multiverso Cuántico

9.1 Integrando Perspectivas de la Cosmología Cuántica e Interpretaciones de la Mecánica Cuántica

La exploración de la cosmología cuántica y varias interpretaciones de la mecánica cuántica revela un panorama complejo y fascinante de la naturaleza fundamental de nuestro universo y la posible existencia de otros. La cosmología cuántica se esfuerza por unificar la mecánica cuántica y la relatividad general para comprender el universo en sus inicios y a la escala de Planck, enfrentando desafíos como el problema del tiempo y la singularidad del Big Bang [3]. El problema de la medición en la mecánica cuántica ha dado lugar a interpretaciones alternativas como la Interpretación de Muchos Mundos (MWI), que postula la existencia de universos paralelos para evitar el colapso de la función de onda, aunque esto conlleva sus propios desafíos relacionados con la probabilidad y la ontología [1]. La teoría del universo bloque presenta una visión del tiempo como una dimensión más, donde todos los momentos coexisten, lo que tiene implicaciones para la causalidad y el libre albedrío y se relaciona con la MWI al sugerir un bloque "multiverso" [71]. La búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad ha llevado a enfoques como la gravedad cuántica de bucles y la teoría de cuerdas, que sugieren la posibilidad de un espacio-tiempo discreto [1]. Los principios holográfico y de complementariedad ofrecen perspectivas adicionales sobre la naturaleza fundamental de la realidad y la posible emergencia del espacio-tiempo y la probabilidad cuántica [1]. Finalmente, la mecánica bohmiana presenta una interpretación determinista con variables ocultas no locales [1].

9.2 Presentación Detallada del Modelo Propuesto del Multiverso Cuántico

El modelo de multiverso cuántico propuesto en esta tesis se basa en la distinción entre niveles epistemológicos y ontológicos. Los tres primeros niveles se conciben como epistemológicos, relacionados con nuestra forma de conocer o acceder a la posibilidad de otros universos, mientras que el cuarto nivel representa la forma ontológica del universo mismo.



- **Nivel 1 Epistemológico: El Multiverso Observable.** Este nivel abarca las regiones del espacio-tiempo que son actualmente inobservables desde nuestra perspectiva debido a la expansión del universo y la velocidad finita de la luz. La existencia de estos universos se infiere de la asunción de un espacio infinito y distribuciones de materia aproximadamente uniformes [1].
- **Nivel 2 Epistemológico: El Multiverso de Parámetros.** Este nivel considera la posibilidad de universos con diferentes constantes físicas o leyes de la física, tal como se sugiere en el multiverso inflacionario. Estos universos burbuja podrían haber surgido de la inflación eterna con diferentes rupturas de simetría [1].
- **Nivel 3 Epistemológico: El Multiverso Interpretativo.** Este nivel surge de las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica, particularmente la Interpretación de Muchos Mundos (MWI). Cada rama de la función de onda universal representa un universo paralelo donde se realiza un resultado diferente de un evento cuántico [1]. La existencia de estos mundos es una consecuencia de tomar la función de onda como una descripción físicamente real.
- **Nivel 4 Ontológico: El Multiverso Discreto.** Este nivel representa la existencia fundamental de todos los posibles universos, basados en la idea de un espacio-tiempo discreto a la escala de Planck. Diferentes universos corresponden a diferentes configuraciones o estados de estas unidades fundamentales discretas, posiblemente regidos por diferentes estructuras matemáticas [3].

La distinción clave entre los niveles epistemológicos y el nivel ontológico radica en que los primeros se refieren a nuestra capacidad de conocer o inferir la existencia de otros universos a través de la observación y la teoría, mientras que el cuarto nivel postula su existencia fundamental como una propiedad inherente de la realidad a la escala más profunda.

9.3 Características Clave, Implicaciones y Potencial para Futuras Investigaciones

El modelo propuesto del multiverso cuántico ofrece una nueva perspectiva al clasificar los niveles en función de su naturaleza epistemológica u ontológica. Sugiere que nuestra comprensión inicial del multiverso está intrínsecamente ligada a nuestras limitaciones observacionales e interpretativas, culminando en un nivel ontológico que representa la realidad fundamental de la existencia. Este modelo podría ayudar a aclarar las diferentes formas en que se discute el concepto de multiverso y proporcionar un marco para futuras investigaciones en cosmología cuántica y teorías relacionadas.

Las implicaciones de este modelo son amplias. Sugiere que la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica, tal como se aborda en el tercer nivel epistemológico (MWI), podría ser una propiedad emergente de una realidad más fundamental y determinista a nivel ontológico (Nivel 4). La idea de un espacio-tiempo discreto como base del Nivel 4 podría tener profundas consecuencias para nuestra comprensión de la gravedad, las singularidades y la estructura misma del universo.

Las futuras investigaciones podrían centrarse en desarrollar un marco matemático más detallado para describir el Nivel 4 ontológico, explorando diferentes modelos de espacio-tiempo discreto y su relación con las teorías de gravedad cuántica como la LQG y la teoría de cuerdas. También sería valioso investigar cómo los principios holográfico y de complementariedad podrían proporcionar una conexión entre los niveles epistemológicos y ontológicos del modelo propuesto, tal vez sugiriendo que nuestra percepción del espacio-tiempo continuo y la probabilidad cuántica emerge de una realidad discreta fundamental. Además, la exploración de las implicaciones filosóficas de este modelo, particularmente en lo que respecta a la naturaleza de la realidad, la conciencia y la interpretación de la mecánica cuántica, podría ser un área fructífera para futuras investigaciones.

Capítulo 10: Conclusión

La presente tesis doctoral ha explorado el concepto del universo a un nivel fundamental desde una perspectiva novedosa, distinguiendo entre niveles epistemológicos, relacionados con nuestra forma de conocer y observar la realidad, y un nivel ontológico, que representa la naturaleza cuántica de la existencia. Al analizar críticamente la clasificación de multiversos de Tegmark y contrastarla con el modelo propuesto, se ha

puesto de manifiesto la importancia de considerar las limitaciones de nuestro conocimiento y las diferentes interpretaciones teóricas al abordar la posibilidad de otros universos.

La investigación ha profundizado en los principios fundamentales de la cosmología cuántica, destacando la búsqueda de una teoría unificada que combine la mecánica cuántica y la relatividad general, así como los desafíos inherentes a esta empresa, como el problema del tiempo y la singularidad del Big Bang. La exploración del problema de la medición en la mecánica cuántica y el análisis detallado de la Interpretación de Muchos Mundos han revelado las complejidades y las profundas implicaciones de esta interpretación para nuestra comprensión de la realidad y la probabilidad.

El concepto del universo bloque ha sido examinado en su relación con la cosmología cuántica y la MWI, sugiriendo un marco donde todas las posibles historias cuánticas podrían coexistir dentro de un bloque espacio-temporal eterno. La tesis también ha abordado las teorías actuales sobre la gravedad cuántica, como la gravedad cuántica de bucles y la teoría de cuerdas, y cómo podrían integrarse en un modelo de cosmología cuántica con un espacio-tiempo discreto, que se propone como la base ontológica del multiverso en el modelo presentado.

Finalmente, la investigación ha explorado los principios holográfico y de complementariedad en el contexto de la cosmología y la gravedad cuántica, sugiriendo posibles vías para la emergencia del espacio-tiempo y la regla de Born a partir de una descripción más fundamental. La comparación con la interpretación de Bohm como una teoría de variables ocultas ha proporcionado una perspectiva alternativa sobre la naturaleza de la realidad cuántica y su posible relación con un modelo de multiverso.

En conclusión, esta tesis ha desarrollado una estructura detallada para comprender el multiverso cuántico, integrando conceptos de la cosmología cuántica, las interpretaciones de la mecánica cuántica y las teorías de la gravedad. El modelo propuesto, con su distinción entre niveles epistemológicos y un nivel ontológico basado en un espacio-tiempo discreto, ofrece una nueva perspectiva sobre la naturaleza del multiverso y abre caminos para futuras investigaciones en este fascinante y fundamental campo de la física teórica.

Referencias en progreso (faltan referencias, resto en archivo (proto) Thesis of Physics: TOE - Quantum Cosmology, Gravity, and Contextual implications.)

1. Welcome to the Multiverse: Sci-Fi or Science? | Ruth Dillon-Mansfield, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://ruth-dm.co.uk/posts/welcome-to-the-multiverse/
2. Multiverse - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Multiverse

3. Quantum Cosmology-An introduction - Imperial College London, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/theoretical-physics/msc/dissertations/2021/Phivos-Philippides-Dissertation.pdf
4. A STUDY OF THE PROBLEM OF TIME IN A FRIEDMANN QUANTUM COSMOLOGY - AMS Tesi di Laurea, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://amslaurea.unibo.it/id/eprint/21716/1/PerezJ.Thesis.pdf
5. Four levels of Multiverse || Real Science behind Parallel Worlds - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://m.youtube.com/watch?v=FAblDXQ7yjY
6. Math of Max Tegmark's "Level I" multiverse. : r/cosmology - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/cosmology/comments/k3j1g2/math_of_max_tegmarks_level_i_multiverse/
7. What are the different levels of the Multiverse? - Primitive Proton, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://primitiveproton.com/what-are-the-different-levels-of-the-multiverse/
8. Many-worlds interpretation - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds_interpretation
9. Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics - Stanford Encyclopedia of Philosophy, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/
10. The Many-Worlds Theory, Explained | The MIT Press Reader, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://thereader.mitpress.mit.edu/the-many-worlds-theory/
11. Learn about the many-worlds picture of quantum mechanics - Britannica, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.britannica.com/video/Description-worlds-picture-quantum-mechanics/-204065
12. Why the Many-Worlds Interpretation Has Many Problems - Quanta Magazine, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.quantamagazine.org/why-the-many-worlds-interpretation-has-many-problems-20181018/
13. Does Everett's interpretation of QM necessarily imply "many worlds"?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/787591/does-everetts-interpretation-of-qm-necessarily-imply-many-worlds
14. The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics: A Fundamental Exposition by Hugh Everett, III, with Papers by J. A. Wheeler, B. S. DeWitt, L. N. ... and N. Graham (Princeton Series in Physics) - Amazon.com, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.amazon.com/Interpretation-Quantum-Mechanics-Princeton-Library/dp/069161895X
15. Everettian Interpretations of Quantum Mechanics - Internet Encyclopedia of Philosophy, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://iep.utm.edu/everett/
16. The Everett Interpretation of Quantum Mechanics: Collected Works 1955-1980 with Commentary - Amazon.com, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.amazon.com/Everett-Interpretation-Quantum-Mechanics-Commentary/dp/0691145075
17. plato.stanford.edu, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://plato.stanford.edu/entries/qm-

manyworlds/#:~:text=The%20Many%2DWorlds%20Interpretation%20(MWI,and%20thus%20from%20all%20physics.
18. Revolutionizing Quantum Mechanics: The Birth and Evolution of the Many-Worlds Interpretation - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/html/2405.06924v1
19. Measurement problem - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement_problem
20. What is the quantum measurement problem? - Sabine Hossenfelder: Backreaction, fecha de acceso: marzo 23, 2025, http://backreaction.blogspot.com/2019/10/what-is-quantum-measurement-problem.html
21. Decoherence and the Many-Worlds Interpretation, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://people.bss.phy.cam.ac.uk/~mjd1014/squark.html
22. What is the relationship between quantum decoherence and the Many Worlds interpretation? - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/quantum/comments/25mr6l/what_is_the_relationship_between_quantum/
23. The Pennsylvania State University The Graduate School LOOP QUANTUM COSMOLOGY: ANISOTROPIES AND INHOMOGENEITIES A Dissertation in, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/1866
24. The Pennsylvania State University The Graduate School LOOP QUANTUM COSMOLOGY AND THE EARLY UNIVERSE A Dissertation in Physics by - Inspire HEP, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://inspirehep.net/files/991e1248ddada53464d78d511d6300c1
25. The Pennsylvania State University The Graduate School LOOP QUANTUM COSMOLOGY: A WINDOW INTO THE PATH INTEGRAL REPRESENTATION OF, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/70
26. Quantum Cosmology and Quantum Foundations | Department of Physics, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.oregonstate.edu/research/quantum-cosmology-and-foundations
27. Quantum Gravity - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=CbPWYjnQIO8
28. Loop quantum gravity, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Loop_quantum_gravity
29. Loop Quantum Gravity - PMC - PubMed Central, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5567241/
30. Can someone please give the simplest (as possible) explanation of Loop Quantum Gravity?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/askscience/comments/1lbr4t/can_someone_please_give_the_simplest_as_possible/
31. Loop Quantum Gravity - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=QMpkFde3euA
32. Loop Quantum Gravity Explained - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=L2suMPiuog4

33. Loop quantum gravity: Does space-time come in tiny chunks?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.space.com/loop-quantum-gravity-space-time-quantized
34. Spacetime Discreteness: Shedding Light on Two of the Simplest Observations in Physics, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=85341
35. Discrete spacetime: what does it mean for spacetime fields and vacuum? - Physics Stack Exchange, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/521693/discrete-spacetime-what-does-it-mean-for-spacetime-fields-and-vacuum
36. Non-perturbative quantum gravity: a conformal perspective - High Energy Physics, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://hef.ru.nl/~tbudd/docs/thesis-ebook.pdf
37. Foundations of Quantum Cosmology by Martin Bojowald - IOP Publishing: Bookstore, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://store.ioppublishing.org/page/detail/Foundations-of-Quantum-Cosmology//?k=9780750324601
38. Quantum Gravity: The Quest for the Pixelation of Space - Caltech Magazine, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://magazine.caltech.edu/post/quantum-gravity
39. What is quantum gravity? - Space.com, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.space.com/quantum-gravity.html
40. String theory, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/String_theory
41. What is string theory? - Space.com, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.space.com/17594-string-theory.html
42. String theory | Explanation & Definition | Britannica, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.britannica.com/science/string-theory
43. What exactly is string theory : r/astrophysics - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/astrophysics/comments/zpxjcx/what_exactly_is_string_theory/
44. String theory may be inevitable as a unified theory of physics, calculations suggest, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physicsworld.com/a/string-theory-may-be-inevitable-as-a-unified-theory-of-physics-calculations-suggest/
45. Studying quantum gravity with the holographic principle - École polytechnique, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.polytechnique.edu/en/news/studying-quantum-gravity-holographic-principle
46. Holographic principle - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_principle
47. A Novel Approach to Quantum Gravity: Exploring the Holographic Principle - ResearchGate, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.researchgate.net/publication/376799860_A_Novel_Approach_to_Quantum_Gravity_Exploring_the_Holographic_Principle
48. Geometry from algebra: The holographic emergence of spacetime in string theory, fecha de acceso: marzo 23, 2025,

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004PhDT.....147G/abstract
49. Holography as a metaphor for the emergence of spacetime — en - IEA-USP, fecha de acceso: marzo 23, 2025, http://www.iea.usp.br/en/news/holography-as-metaphor-for-the-emergence-of-spacetime
50. Holography as a metaphor for the emergence of spacetime - — Intercontinental Academia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, http://intercontinental-academia.ubias.net/nagoya/news/holography-as-a-metaphor-for-the-emergence-of-spacetime
51. Geometry from Algebra: The Holographic Emergence of Spacetime in String Theory by Surya Ganguli - Inspire HEP, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://inspirehep.net/files/0b5953e9aa72e24f1fa928eedc26d6c3
52. AdS/CFT correspondence - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/AdS/CFT_correspondence
53. What Physicists Mean by Parallel Universes - ThoughtCo, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.thoughtco.com/types-of-parallel-universes-2698854
54. Could the Universe Actually Be a Hologram? | Inquiry | Summer 2024 | Brandeis Magazine, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.brandeis.edu/magazine/2024/summer/inquiry/universe-hologram.html
55. Brian Cox - Multiverse Hypotheses: The Portal to 5th Dimension - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=jOLsuCPNY7k
56. Universe | What if there are other 'yous'? - Multiverse/Parallel Universe. - Obsidian Odyssey, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.ejshin.org/what-if-there-are-other-yous-multiverse-parallel-universe/
57. [hep-th/0203101] The holographic principle - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/abs/hep-th/0203101
58. Time Duality, Multi-Dimensional Time, and the Holographic Principle | by Florin Ghidan, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://medium.com/@fghidan/time-duality-multi-dimensional-time-and-the-holographic-principle-eb2188a5a762
59. holographic principle in nLab, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://ncatlab.org/nlab/show/holographic+principle
60. DISCRETE SPACETIME QUANTUM FIELD THEORY - Computer Science Department, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://cs.du.edu/~mathfiles/preprints/nsm-math-preprint-1704.pdf
61. Three possible implications of spacetime discreteness 1. Introduction - PhilArchive, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://philarchive.org/archive/GAOTIO
62. Quantum Cosmology | Academic Block, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.academicblock.com/science/physics-of-the-universe/quantum-cosmology
63. Unifying quantum mechanics with Einstein's general relativity - Research Outreach, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://researchoutreach.org/articles/unifying-quantum-mechanics-einstein-general-relativity/
64. New Theory Unites Quantum Physics and General Relativity - Highways Today, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://highways.today/2024/09/04/quantum-physics-and-general-relativity/

65. New Math Brings Us One Step Closer to Unifying Einstein's Relativity and Quantum Physics (Updated) - The Debrief, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://thedebrief.org/new-math-brings-us-one-step-closer-to-unifying-einsteins-relativity-and-quantum-physics/
66. Theory of everything - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_everything
67. Complementarity principle | Quantum mechanics, Wave-particle duality, Uncertainty | Britannica, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.britannica.com/science/complementarity-principle
68. Copenhagen interpretation - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen_interpretation
69. List of unsolved problems in physics - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unsolved_problems_in_physics
70. How does string theory try to Unite Quantum mechanics with General relativity?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/320165/how-does-string-theory-try-to-unite-quantum-mechanics-with-general-relativity
71. Block Universe Theory - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=Fe3xJKC6Z30
72. The Nature of Time: Exploring the Block Universe and Beyond | Education - Vocal Media, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://vocal.media/education/the-nature-of-time-exploring-the-block-universe-and-beyond
73. Eternalism (philosophy of time) - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Eternalism_(philosophy_of_time)
74. Quantum gravity - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_gravity
75. Quantum Cosmology and the Age of the Universe - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/html/2502.03075v1
76. Mini-Superspace Quantum Cosmology and the World Line Approach i - OSTI, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.osti.gov/servlets/purl/1619263
77. Challenging Routes in Quantum Cosmology - World Scientific Publishing, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/8540
78. [2211.09173] The problem of time in quantum cosmology - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/abs/2211.09173
79. Parampreet Singh: Loop Quantum Cosmology - Lecture 1 - Loops'24 Summer School, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=Vn6Q1L8gQ4E
80. The Challenges of Quantum Gravity | Djordje Minic - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=7T6pinf7fLg
81. What are the constraints on a quantum gravity theory? [duplicate] - Physics Stack Exchange, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/765303/what-are-the-constraints-on-a-quantum-gravity-theory
82. The measurement problem in Quantum Mechanics, fecha de acceso: marzo 23, 2025,

https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/180305/1/GIL%20PORTAL%20ERIC_3085535_assignsubmission_file_TFG-Gil-Portal-Eric.pdf
83. The Measurement Problem - University of Pittsburgh, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://sites.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/quantum_theory_measurement/index.html
84. Interpretations of quantum mechanics - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics
85. Interpretations of Quantum Mechanics - Internet Encyclopedia of Philosophy, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://iep.utm.edu/int-qm/
86. The Interpretations of Quantum Mechanics - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=mqofuYCz9gs
87. Arguments for and against Many Worlds? - Physics Stack Exchange, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/6096/arguments-for-and-against-many-worlds
88. The Wrong Objections to the Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.preposterousuniverse.com/blog/2015/02/19/the-wrong-objections-to-the-many-worlds-interpretation-of-quantum-mechanics/
89. [2311.03467] On playing gods: The fallacy of the many-worlds interpretation - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/abs/2311.03467
90. Probability in many-worlds theories - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/pdf/2106.16145
91. Many Worlds, the Born Rule, and Self-Locating Uncertainty1 - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/pdf/1405.7907
92. Derivation of the Born rule from many-worlds interpretation and probability theory, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://xseek-qm.net/Quantum_Probability_e.htm
93. Born rule - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Born_rule
94. www.tau.ac.il, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.tau.ac.il/~vaidman/lvhp/m117.pdf
95. Probability in many-worlds theories (many worlds, many Earths, many versions in quantum mechanics) | by Anastasiya Khromova, Dr. rer. nat. | Medium, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://medium.com/@anastasiya.khromova17/probability-in-many-worlds-theories-many-worlds-many-earths-many-versions-in-quantum-mechanics-7af9f0b4ff46
96. A simple proof of Born's rule for statistical interpretation of quantum mechanics - PhilSci-Archive, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://philsci-archive.pitt.edu/12810/1/Dikshit-Born-rule-preprint.pdf
97. If the Many Worlds interpretation (MWI) cannot derive the Born rule, would that mean that it is wrong? - Physics Stack Exchange, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/346351/if-the-many-worlds-interpretation-mwi-cannot-derive-the-born-rule-would-that

98. On Zurek's Derivation of the Born Rule, fecha de acceso: marzo 23, 2025, http://faculty.up.edu/schlosshauer/publications/bornrule.pdf
99. Derivations of the Born Rule - PhilSci-Archive, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://philsci-archive.pitt.edu/15943/1/BornRule24-4-19.pdf
100. How does the Born rule arise in MWI? : r/askscience - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/askscience/comments/3q6g54/how_does_the_born_rule_arise_in_mwi/
101. Quantum Mechanics and Decision Theory - Sean Carroll, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.preposterousuniverse.com/blog/2012/04/16/quantum-mechanics-and-decision-theory/
102. How does many worlds interpretation work for non-50/50 probabilities?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/536522/how-does-many-worlds-interpretation-work-for-non-50-50-probabilities
103. Probability in many-world theories - PIRSA, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://pirsa.org/19040047
104. Many-worlds, probabilities, and world stacks - SelfAwarePatterns, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://selfawarepatterns.com/2023/12/02/many-worlds-probabilities-and-world-stacks/
105. Emergence of the Born rule in quantum optics, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://quantum-journal.org/papers/q-2020-10-26-350/pdf/
106. The Block Universe Theory Explained - RealClearScience, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.realclearscience.com/2018/09/03/the_block_universe_theory_explained_282664.html
107. The Funky Physics of Reality. A Block Universe | by Stephen Geist - Medium, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://medium.com/@stphngeist/the-funky-physics-of-reality-552d8aee4e94
108. Theories of the Universe: Presentism, Block Universe, and Growing Block | by Brian Liou, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://medium.com/@brianhliou/theories-of-the-universe-presentism-block-universe-and-growing-block-009c96e38e61
109. Ethics, death and the block universe | Nikk Effingham - IAI TV, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://iai.tv/articles/ethics-death-and-the-block-universe-nikk-effingham-auid-2461
110. medium.com, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://medium.com/@brianhliou/theories-of-the-universe-presentism-block-universe-and-growing-block-009c96e38e61#:~:text=Overview%3A%20The%20block%20universe%20theory,and%20future)%20are%20equally%20real.
111. the most fundamental and universal refutations of free will: causality, acausality, and the b-series of time. : r/freewill - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/freewill/comments/1ba9hmb/the_most_fundamental_and_universal_refutations_of/

112. Four Dimension block universe Shattered - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=nqf9_Dl4-XY
113. A PBS Space Time series on time and the block universe - SelfAwarePatterns, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://selfawarepatterns.com/2020/10/31/a-pbs-space-time-series-on-time-and-the-block-universe/
114. Why does the Block Universe theory seem so controversial even though it is what General Relativity describes? - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/17velfs/why_does_the_block_universe_theory_seem_so/
115. Some remarks on the mathematical structure of the multiverse - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/pdf/1602.04247
116. iai.tv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://iai.tv/articles/ethics-death-and-the-block-universe-nikk-effingham-auid-2461#:~:text=The%20four%2Ddimensional%20block%20universe,freedom%2C%20responsibility%2C%20and%20death.
117. Block Universe and experience - The Philosophy Forum, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://thephilosophyforum.com/discussion/9682/block-universe-and-experience
118. Block Universe "theory" - what is it all about - your opinions : r/AskPhysics - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/1fs22vl/block_universe_theory_what_is_it_all_about_your/
119. objections to the block universe : r/PhilosophyofScience - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/PhilosophyofScience/comments/z3qx7k/objections_to_the_block_universe/
120. Growing block universe - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Growing_block_universe
121. A Debate Over the Physics of Time - Quanta Magazine, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.quantamagazine.org/a-debate-over-the-physics-of-time-20160719/
122. Time's Illusion and the Block Universe Theory: Eternalism - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=rAxXIC-wAoo
123. On Time, Causality, and the Block Universe (Paperback) | Sherman's Maine Coast Book Shop, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.shermans.com/book/9781913136444
124. Time Steps vs Causality vs Block Universe - Infinity Is A Misconception, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://infinitymisconception.com/time-vs-causality/what-is-time.php
125. On Time, Causality, and the Block Universe - Books - Amazon.com, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.amazon.com/Time-Causality-Block-Universe/dp/1913136442
126. Superdeterminism? - The Philosophy Forum, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://thephilosophyforum.com/discussion/13299/superdeterminism/p2
127. The quantum theory of time, the block universe, and human experience | Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and

Engineering Sciences, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2017.0316
128. Quantum Gravity Effects in Cosmology - EPJ Web of Conferences, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2018/03/epjconf_icgaxiii-ik2018_03001.pdf
129. A new theory of quantum gravity could explain the biggest puzzle in cosmology, study suggests | Live Science, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.livescience.com/physics-mathematics/a-new-theory-of-quantum-gravity-could-explain-the-biggest-puzzle-in-cosmology-study-suggests
130. Quantum Gravity and Quantum Cosmology - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=xcJ7diTtURc
131. Remarks on Space-time and Locality in Everett's Interpretation - PhilSci-Archive, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://philsci-archive.pitt.edu/504/2/cracow.pdf
132. What if the universe is actually a block-multiverse? : r/HypotheticalPhysics - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/HypotheticalPhysics/comments/1ez3uju/what_if_the_universe_is_actually_a_blockmultiverse/
133. Does Space Emerge From A Holographic Boundary? - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=DoCYY9sa2kU
134. Quantum gravity in the can: The holographic principle | plus.maths.org, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://plus.maths.org/content/quantum-gravity-can-holographic-principle
135. [1610.06236] Holographic Theory of Gravity and Cosmology - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/abs/1610.06236
136. The Holographic Principle of Mind and the Evolution of Consciousness - Digital Commons @ CIIS, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://digitalcommons.ciis.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1031&context=cejournal
137. How might the holographic principle reshape our understanding of quantum entanglement and the early universe? : r/AskScienceDiscussion - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/AskScienceDiscussion/comments/1f61d1s/how_might_the_holographic_principle_reshape_our/
138. Is The Universe a Hologram? Brian Greene on Quantum Gravity & Black Holes - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://m.youtube.com/watch?v=3n10ovuND0Q&pp=ygULI2hvbG90aGVvcnk%3D
139. Holographic Principle Explained | Sean Carroll and Lex Fridman - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=1_ibTNDV8aU
140. The Origins of the Universe: The holographic principle and M-theory, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.ctc.cam.ac.uk/outreach/origins/quantum_cosmology_five.php
141. ads cft - Nature of spacetime in the holographic boundary - Physics Stack Exchange, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/775059/nature-of-spacetime-in-the-holographic-boundary

142. In what sense is there a correspondence between AdS/CFT? : r/TheoreticalPhysics - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/TheoreticalPhysics/comments/10fthad/in_what_sense_is_there_a_correspondence_between/
143. Solving the black hole information paradox - Research Outreach, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://researchoutreach.org/articles/solving-black-hole-information-paradox/
144. Holographic Universe Principle. Black hole Information Paradox | by Victor Bhaura | Science Junction | Medium, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://medium.com/science-junction/holographic-universe-principle-2e95d02602e5
145. What exactly is 'information' when it comes to the Black Hole Information Paradox and the Holographic Principle? : r/AskPhysics - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/1dbu8p3/what_exactly_is_information_when_it_comes_to_the/
146. Hawking's black hole paradox explained - Fabio Pacucci - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=r5Pcqkhmp_0
147. ToE-Quantum Space-7 - The theory of everything by Marek Ożarowski, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://theoryofeverything.info/2024/02/toe-quantum-space-7/
148. Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime: Carroll, Sean: 9781524743017 - Amazon.com, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.amazon.com/Something-Deeply-Hidden-Emergence-Spacetime/dp/1524743011
149. Does the many-worlds interpretation hold the key to spacetime? | Physics Today, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://pubs.aip.org/physicstoday/article/72/12/56/811728/Does-the-many-worlds-interpretation-hold-the-key
150. en.wikipedia.org, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Complementarity_(physics)#:~:text=The%20complementarity%20principle%20holds%20that,principle%20and%20wave%2Dparticle%20duality.
151. Complementarity (physics) - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Complementarity_(physics)
152. The definition of the complementarity principle - Physics Stack Exchange, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/595735/the-definition-of-the-complementarity-principle
153. An updated quantum complementarity principle | Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences - Journals, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.2024.0517
154. arxiv.org, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/abs/2312.02743#:~:text=Bohr's%20complementarity%20principle%20has%20long,P%2C%20but%20not%20both%20simultaneously.

155. [2312.02743] An Updated Quantum Complementarity Principle - arXiv, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/abs/2312.02743
156. The complementarity principle - Mapping Ignorance, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://mappingignorance.org/2016/02/11/the-complementarity-principle/
157. arxiv.org, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/abs/hep-ph/0508106
158. Quantum Complementarity Meets Gravitational Redshift - 2Physics, fecha de acceso: marzo 23, 2025, http://www.2physics.com/2012/01/quantum-complementarity-meets.html
159. Interpreting the quantum mechanics of cosmology - PhilSci-Archive, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://philsci-archive.pitt.edu/15295/1/everett%20cosmology.pdf
160. De Broglie–Bohm theory - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/De_Broglie%E2%80%93Bohm_theory
161. Can Bohmian mechanics be made relativistic? - PMC, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3896068/
162. What you always wanted to know about Bohmian mechanics but were afraid to aska 1 Introduction - PhilSci-Archive, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://philsci-archive.pitt.edu/3026/1/bohm.pdf
163. What are the key differences between Bohmian Mechanics and Super Determinism?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/y9vcu6/what_are_the_key_differences_between_bohmian/
164. Are there any viable toy models of superdeterministic quantum mechanics?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/151593/are-there-any-viable-toy-models-of-superdeterministic-quantum-mechanics
165. De Broglie-Bohm Pilot-Wave Theory: Many Worlds in Denial? - ResearchGate, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.researchgate.net/publication/23417425_De_Broglie-Bohm_Pilot-Wave_Theory_Many_Worlds_in_Denial
166. Bohmian mechanics and cosmology by Ward Struyve - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=cd6w_vl7aso
167. Bohmian quantum gravity and cosmology arXiv:1801.03353v2 [gr-qc] 21 Aug 2019, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://arxiv.org/pdf/1801.03353
168. What about Bohmian mechanics? : r/QuantumPhysics - Reddit, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.reddit.com/r/QuantumPhysics/comments/rtugyz/what_about_bohmian_mechanics/
169. Bohmian mechanics - Stanford Encyclopedia of Philosophy, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm/
170. Criticisms - Bohmian Mechanics, fecha de acceso: marzo 23, 2025, http://www.bohmianmechanics.org/background/criticisms.html
171. What are the Criticisms of Bohmian Mechanics? | Sheldon Goldstein - YouTube, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=1KKdVI6A2Fw

172. What Are the Problems with Bohmian Mechanics? | Tim Maudlin & Sheldon Goldstein, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=imdUkcjqfaQ
173. Superdeterminism - Wikipedia, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Superdeterminism
174. What does the world look like according to superdeterminism? - PhilSci-Archive, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://philsci-archive.pitt.edu/18176/1/Baas_Le_Bihan_draft.pdf
175. Consistent histories and Bohmian mechanics, many worlds in disguise?, fecha de acceso: marzo 23, 2025, https://physics.stackexchange.com/questions/51294/consistent-histories-and-bohmian-mechanics-many-worlds-in-disguise